



TESIS SF 142502

PERANCANGAN SENSOR TEMPERATUR TINGGI BERBASIS FIBER BRAGG GRATING (*FBG*) TIPE BIMETAL

ANDI ROSMAN N
NRP 1113201034

Dosen Pembimbing
Dr. Melania Suweni Muntini, MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN FISIKA INSTRUMENTASI
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS SF 142502

A DESIGN OF HIGH TEMPERATURE SENSOR BASED ON FIBER BRAGG GRATING (FBG) BIMETALLIC TYPE

ANDI ROSMAN N
NRP 1113201034

SUPERVISOR
Dr. Melania Suweni Muntini, MT

MAGISTER PROGRAM
STUDY ON INSTRUMENTATION SCIENCES
DEPARTEMENT OF PHYSICS
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECNOLOGY
SURABAYA
2015

**PERANCANGAN SENSOR TEMPERATUR TINGGI BERBASIS
FIBER BRAGG GRATING (FBG) TIPE BIMETAL**

**Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

oleh:

**ANDI ROSMAN N
NRP. 1113201034**

**Tanggal Ujian
Periode Wisuda**

**: 25 Juni 2015
: September 2015**


Disetujui oleh:


**1. Dr. Melania Suweni Muntini, MT.
NIP. 19641229 199002 2 001**

(Pembimbing)


2. Prof. Mahmud Zaki, M.Sc.

(Penguji)


**3. Endarko, Ph.D.
NIP. 19741117 199903 1 001**

(Penguji)


Direktur Program Pascasarjana

**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 19640405 199002 1 001**

PERANCANGAN SENSOR TEMPERATUR TINGGI BERBASIS *FIBER BRAGG GRATING* (FBG) TIPE BIMETAL

Nama mahasiswa : A. Rosman N
NRP : 1113201034
Pembimbing : Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

ABSTRAK

Temperatur merupakan salah satu parameter fisis yang sangat penting didalam menjelaskan kondisi suatu lingkungan. Selama ini, telah banyak dikembangkan sensor temperatur baik berbasis pemuaian, resistansi bahan, maupun berbasis optik. Telah dirancang dan dibuat sensor temperatur tinggi berbasis Fiber Bragg Grating (*FBG*) tipe bimetal. Tujuan penggunaan bimetal yang ditempel pada FBG adalah untuk meningkatkan sensitifitas dari sensor. FBG yang digunakan adalah FBG dengan bahan *polymide* dan panjang gelombang Bragg 1550 nm. Penelitian ini dibagi atas dua tahapan yaitu mengkarakterisasi FBG akibat pengaruh temperatur dan mengkarakterisasi sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal. Prinsip kerja dari kedua tahapan penelitian ini adalah mengukur pergeseran panjang gelombang Bragg $\Delta\lambda_B$ yang terbaca di *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) akibat pengaruh perubahan temperatur ΔT . Dari hubungan antara perubahan temperatur dengan pergeseran panjang gelombang Bragg akan ditentukan karakteristik dari sensor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensitifitas dari sensor FBG murni adalah 13 pm/ $^{\circ}\text{C}$ dengan akurasi 0,0077. Sementara sensitifitas yang dihasilkan oleh sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal adalah 21,2 pm/ $^{\circ}\text{C}$ dengan akurasi 0,0119. Peningkatan nilai sensitifitas dari sensor karena adanya efek regangan sebagai fungsi temperatur pada FBG yang ditempelkan pada bimetal. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sensitifitas sensor mengalami peningkatan jika FBG ditempelkan pada pelat bimetal.

Kata Kunci ; *Fiber Bragg Grating* (FBG), sensor temperatur, sensitifitas, bimetal, *Optical Spectrum Analyzer* (OSA)

A Design of High Temperature Sensor Based on Fiber Bragg Grating (FBG) Bimetallic Type

Name : A. Rosman N
NRP : 1113201034
Supervisor : Dr. Melania Suweni Muntini, MT.

Abstract

Temperature is one of the most important physical parameters in describing the condition of the environment. Until now, the temperature sensor has been developed either based on expansion, based on resistance of a material, and optically based. It has been designed and manufactured high-temperature sensors based on Fiber Bragg Grating (FBG) bimetal type. The aim of using bimetallic affixed to the FBG is to increase the sensitivity of the sensor. FBG is used as polyimide material with FBG whereby has Bragg wavelength of 1550 nm. This study is divided into two stages, namely characterize FBG due to the influence of temperature and characterize temperature sensor based on FBG of bimetal type. The process principle of both stages in this study is to measure the wavelength shift Bragg $\Delta\lambda_B$ which is legible in Optical Spectrum Analyzer (OSA) due to the effect of temperature changes ΔT . Based on the relationship between changes in temperature and Bragg wavelength shift will be determined the characteristics of the sensor. The results show that the sensitivity of pure FBG sensor is 13 pm/ $^{\circ}$ C with an accuracy of 0.0077. However, the sensitivities generated by temperature sensor based on FBG of bimetal type is 21.2 pm/ $^{\circ}$ C with an accuracy of 0.0119. Sensitivity increase of the sensor values due to the additional effect of such strain on the FBG is attached to the bimetal. Based on these results, it can be concluded that the sensitivity of the sensor increases if FBG is attached to the bimetal plate.

Keywords ; Fiber Bragg Grating (FBG), temperature sensor, sensitivity, Bimetallic, Optical Spectrum Analyzer (OSA).

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'aalamin, segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul:

**“PERANCANGAN SENSOR TEMPERATUR TINGGI BERBASIS
FIBER BRAGG GRATING (FBG) TIPE BIMETAL.”**

Penelitian ini diajukan untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) Jurusan Fisika Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tesis ini dapat terselesaikan dengan baik karena adanya bantuan, arahan, bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda dan ibunda tercinta (Andi Nur Alam & Andi Rosdiana) yang telah mendidik dan membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang, ketulusan, kesabaran, dan doa beliau sehingga penulis mampu melewati ini semua. Terima kasih juga buat saudara-saudaraku, Andi Gustinawati dan Andi Samratulangi.
2. Ibu Dr. Melania Suweni Muntini, MT. selaku dosen wali dan pembimbing yang telah memberikan nasehat, arahan, semangat, dan bimbingan dengan penuh kesabaran kepada penulis selama penyusunan tesis ini.
3. Bapak Prof. Mahmud Zaki, M.Sc selaku dosen penguji yang telah memberi saran dan masukan untuk kesempurnaan tesis ini.
4. Bapak Endarko, Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberi saran dan masukan untuk kesempurnaan tesis ini.
5. DIKTI selaku pemberi beasiswa, terima kasih atas kesempatan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan studi program Magister (S2) Fisika FMIPA ITS Surabaya.
6. Teman-teman di Lab. Instrumentasi (Mas Adi, Haerul Ahmadi, Okta, Hadisan, Pak Ricard, Pak Sagita, Tobias, Burhan, Taslim, Kak Ummu, A.Ayu, Mba Devi, Mba Lia)
7. Nur Fadhilah Umar S.Pd.,M.Pd yang selalu hadir menemani penulis dalam suka maupun duka.

8. Teman-teman seperantauan di *RUDAL* (*kak ichsan-madi-ippang-aan-kak Yaz*), *RADAR* (*asra-ayu-uny-winda*), dan *R6* (*iccanak, ivan, agus*).

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih banyak kekurangannya. Olehnya itu, kritik dan saran demi kesempurnaannya sangat penulis harapkan. Semoga hasil penelitian ini memberikan manfaat bagi kita semua Aamiin.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	7
1.1. Fiber Optik.....	7
1.2. Fiber Optik Bragg Grating (FBG)	9
1.3. Prinsip Kerja Fiber Optik Bragg Grating (FBG)	10
1.4. Sensor Berbasis Fiber Optik Bragg Grating (FBG)	13
1.5. Komponen Sensor Berbasis Fiber Optik Bragg Grating (FBG).....	16
1.6. Struktur dan Prinsip Pengukuran Sensor FBG Tipe Bimetal	23
1.7. Kalibrasi Alat ukur/ Sensor	27
1.8. Kesalahan Dalam Pengukuran.....	28
BAB 3 METODE PENELITIAN	29
3.1. Jenis dan Tempat Penelitian	29
3.2. Alat dan Bahan	29
3.3. Parameter Observasi.....	29
3.4. Prosedur Penelitian.....	30
3.5. Pengolahan, Interpretasi dan Analisis Data dari Sensor FBG	34

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1. Hasil Pengujian Karakteristik dari Fiber Bragg Grating (FBG) Terhadap Temperatur	37
4.2. Hasil Pengujian Pergeseran Bimetal Terhadap Fiber Bragg Grating (FBG)	38
4.3. Pembuatan Head Sensor.....	41
4.4. Karakterisasi Sensor.....	42
4.5. Analisis dan Keunggulan Sensor Temperatur Berbasis FBG tipe Bimetal	50
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN.....	59
TENTANG PENULIS	

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 4.1 Pengaruh temperatur terhadap pergeseran bimetal pada titik ukur di heater.....	40
Tabel 4.2 Pengaruh temperatur terhadap pergeseran bimetal pada titik ukur di FBG	41
Tabel 4.3 Pengaruh pergeseran FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya	51

DAFTAR LAMPIRAN

	Hal
Lampiran A	59
Lampiran B	61
Lampiran C	63
Lampiran D	64
Lampiran E.....	72
Lampiran F.....	73
Lampiran G	74
Lampiran H	75
Lampiran I.....	78

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Temperatur merupakan salah satu parameter fisis yang sangat penting didalam menjelaskan kondisi suatu lingkungan. Kebutuhan akan data temperatur suatu lingkungan telah mendorong manusia untuk membuat suatu sensor untuk mendeteksi temperatur baik secara *real time* (kontinyu) maupun bersifat *insidental* (sesaat). Selama ini telah banyak sensor temperatur yang telah dibuat diantaranya sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*), sensor resistif thermistor, termokopel, dan sensor temperatur silikon.

Beberapa sensor temperatur yang telah ada masih memiliki banyak keterbatasan dan kelemahan. Sebagai contoh sensor RTD harganya masih sangat mahal dan dalam kondisi suhu tinggi sudah tidak linier. Sensor thermistor walaupun harganya murah akan tetapi perubahan resistansi terhadap perubahan temperatur sangat tidak linier, untuk termokopel sensitifitasnya masih rendah dan juga tidak linier (Ahmad Mulia Rambe, 2003). Selain itu, sensor juga mengalami keterbatasan bekerja pada lingkungan yang memiliki kondisi ekstrim seperti suhu tinggi, tekanan tinggi, media bahan kimia yang agresif, pengaruh gelombang elektromagnetik yang kuat, dan paparan radiasi energi tinggi.

Fakta menunjukkan bahwa kondisi lingkungan seperti di atas sering dijumpai dalam berbagai aplikasi industri seperti pembangkit listrik, sistem distribusi logam, industri kaca manufaktur, industri nuklir, dan industri tenaga panas Bumi (*geothermal*). Pengukuran yang akurat dan dapat diandalkan untuk temperatur tinggi diperlukan agar keamanan pengoperasian alat dan efisiensi dalam pengendalian suatu industri dapat terjamin (Parne Saidi Reddy dkk, 2010). Kondisi lingkungan yang ekstrim memerlukan sensor yang dapat mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu pengembangan sensor yang dilakukan adalah sensor berbasis serat optik (fiber optik).

Serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca murni, atau plastik yang panjang dan berdiameter dengan ukuran mikrometer. Serat optik digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat yang lain. Serat optik merupakan pemandu gelombang dielektrik yang beroperasi pada frekuensi/panjang gelombang optik. Panjang gelombang dari serat optik berkisar antara 600 nm-1550 nm. Serat optik membatasi energi elektromagnetik dalam bentuk cahaya didalam permukaannya dan memandu cahaya tersebut dalam arah paralel terhadap aksinya.

Sensor temperatur berbasis serat optik memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sensor konvensional, sensor listrik dan sensor akustik. Diantara kelebihan adalah memiliki sensitivitas tinggi, ukuran yang kompak, kebal/tahan terhadap gelombang elektromagnetik dan kebal di lingkungan korosif yang keras, serta pengukurannya dapat diandalkan pada suhu tinggi (Parne Saidi Reddy dkk, 2010). Selain itu sensor serat optik dapat didesain menjadi sebuah sistem pengukuran dan *remote sensing* (Arifin, dkk, 2014).

Pengukuran terhadap temperatur dalam kondisi khusus ada tiga jenis teknologi serat optik yaitu berbasis intensitas, berbasis FBG (berbasis perubahan panjang gelombang Bragg), dan berbasis Fabry-Perot berongga. Baru-baru ini, sensor temperatur FBG secara intensif diteliti dan banyak diterapkan yang dikodekan dengan panjang gelombang optik dan ketidakbergantungan terhadap intensitas cahaya, konektor ataupun kerugian dari serat optik. Selain itu, beberapa sensor berbasis FBG dapat *dimultipleksin* (terdiri dari banyak bagian) kedalam fiber optik yang tunggal untuk mengukur distribusi tekanan ataupun temperatur sesungguhnya per titik pengukuran suatu objek (Jung Huang, 2013).

Sensor serat optik saat ini menggantikan banyak sensor konvensional untuk berbagai pengukuran besaran-besaran fisis. Penelitian sebelumnya yang menggunakan serat optik sebagai sensor antara lain sensor temperatur dengan menggunakan serat optik *multimode* (Samian, 2010) dengan sensitifitas $9.9 \text{ mV}^{\circ}\text{C}$, desain sensor temperatur berbasis FBG panel panel surya (Mohd Afiq Ismail, dkk, 2011) dengan sensitifitas $14 \text{ pm}^{\circ}\text{C}$, sensor temperatur berbasis FBG

dengan CCG (*chemical composition grating*) (Reddy, Parne Saidi, 2010) dengan sensitifitas $11.44 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, Investigasi karakteristik suhu rendah pada sensor temperatur berbasis FBG (Wei Wu, dkk, 2010) dengan sensitifitas pada FBG yang diselimuti tabung baja, FBG diselimuti dengan metal, dan FBG diselimuti dengan bahan polimer masing-masing adalah $21.3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, $28.3 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, $13.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, Metode kompensasi untuk sensitifitas temperatur dari FBG menggunakan bimetal (Jongseob Song, dkk, 2003) dengan sensitifitas $8.1 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ dan sebagainya

Penggunaan serat optik sebagai sensor temperatur sudah dilakukan seperti pada penelitian diatas, namun masih terbatas pemakaiannya karena rata-rata masih beroperasi pada suhu rendah ($<100^{\circ}\text{C}$). Selain itu masih rendahnya sensitifitas terhadap temperatur tinggi dari sensor yang telah dibuat sehingga diperlukan beberapa teknik untuk meningkatkan sensitifitas terhadap temperatur tinggi dari sensor temperatur berbasis FBG. Sensor berbasis FBG memanfaatkan perubahan panjang gelombang Bragg $\Delta\lambda_B$ akibat pengaruh perubahan regangan $\Delta\epsilon$ dan perubahan temperatur ΔT . Perubahan regangan pada FBG dapat berupa fungsi dari temperatur sehingga dengan memanfaatkan efek perubahan regangan akibat temperatur maka sensitifitas sensor dapat ditingkatkan. Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan sensitifitas pengukuran sensor temperatur berbasis FBG antara lain (1) melekatkan FBG ke bahan polimer, (2) mensolder bahan metal pada mantel FBG berupa bahan silinder elastis, dan (3) diikat/dilem ke bahan bimetal.

Dalam penelitian ini direncanakan merancang sebuah sensor temperatur FBG tipe bimetal. Pemilihan bimetal dikarenakan regangan yang timbul pada bimetal berupa fungsi dari temperatur sehingga sensitifitas dari sensor temperatur akan meningkat. Selain itu, adanya perbedaan koefisien ekspansi termal, panjang dan tebal pada bimetal akan meningkatkan sensitifitas sensor temperatur berbasis FBG. Sumber elemen dari sensor temperatur adalah sebuah struktur bimetal yang diatasnya melekat serat optik FBG. Perubahan panjang gelombang $\Delta\lambda_B$ yang timbul akibat perubahan regangan pada bimetal akibat pemberian variasi temperatur digunakan untuk menentukan hubungan antara perubahan panjang

gelombang $\Delta\lambda_B$ dengan perubahan temperatur ΔT . Berdasarkan hal tersebut maka dapat dibuat sebuah sensor temperatur berbasis serat optik FBG tipe bimetal.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dipaparkan sebelumnya maka perumusan masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana merancang dan membuat sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal?
- b. Bagaimana pengaruh temperatur terhadap luaran dari sensor berupa pergeseran panjang gelombang $\Delta\lambda_B$?
- c. Seberapa besar sensitifitas yang dihasilkan dari sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal?
- d. Bagaimana karakteristik sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk:

- a. Merancang dan membuat sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal.
- b. Menganalisis pengaruh temperatur terhadap luaran dari sensor berupa pergeseran panjang gelombang $\Delta\lambda_B$.
- c. Menganalisis sensitifitas yang dihasilkan dari sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal.
- d. Mengetahui karakteristik sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal.

1.4 Batasan Masalah

Dalam perancangan sensor temperatur ini dibatasi pada:

- a. Cara kerja dari sensor.
- b. Akuisisi data pengukuran pada range temperatur 30-250 $^{\circ}\text{C}$.
- c. Fokus pada pengerjaan pembuatan *head* sensor.

- d. Serat optik yang digunakan adalah serat optik jenis Fiber Bragg Grating (FBG).
- e. Bahan bimetal yang digunakan adalah aluminium dengan tembaga.
- f. Panjang gelombang yang dimanfaatkan adalah panjang gelombang Bragg yang ditransmisikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian adalah untuk memperoleh pengetahuan yang memadai dan desain sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal. Selain itu, manfaat yang diharapkan adalah untuk memberikan sumbangan pemikiran di bidang ilmu pengetahuan terutama di bidang Fisika Instrumentasi mengenai sensor berbasis serat optik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

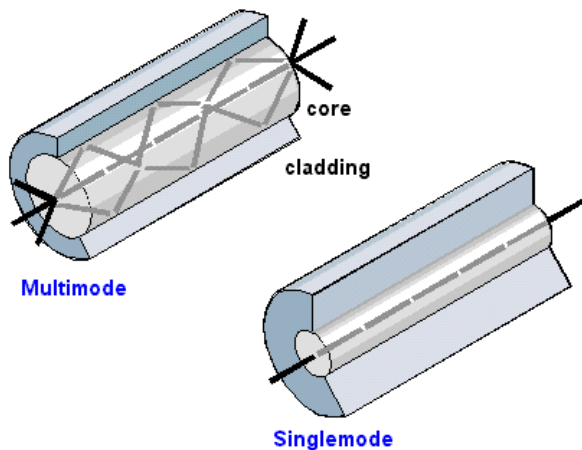
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Fiber Optik

Serat optik atau fiber optik disebut pula dengan serat kaca. Serat optik merupakan media transmisi yang bahan penyusunnya terbuat dari kaca murni atau plastik dengan panjang dan diameternya berukuran mikrometer. Pada sistem komunikasi serat optik, informasi dikirim dalam bentuk sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain. Cahaya yang ada di dalam serat optik sulit keluar karena indeks bias dari kaca lebih besar daripada indeks bias dari udara.

Sumber cahaya yang digunakan adalah laser karena laser mempunyai spektrum yang tajam dan dengan rentang yang sempit (1500-1550 nm). Kecepatan transmisi serat optik sangat tinggi sehingga sangat bagus digunakan sebagai saluran komunikasi. Serat optik umumnya digunakan dalam sistem telekomunikasi. Namun seiring perkembangannya serat optik sudah digunakan dalam hal pencitraan, pencahayaan dan sebagai sensor. Serat optik sebagai sensor telah banyak yang dibuat dan dikembangkan diantaranya serat optik sebagai sensor temperatur, serat optik sebagai sensor pergeseran tanah, serat optik sebagai sensor tekanan, dan serat optik sebagai sensor pH larutan.

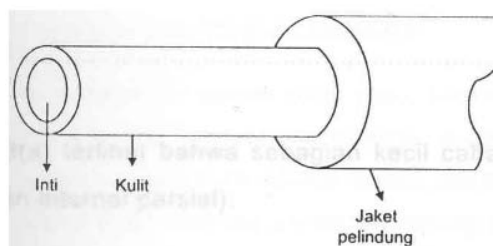
Secara umum serat optik dapat dilihat dari 2 macam perbedaan yaitu serat optik berdasarkan cara (*mode*) perambatannya dan serat optik berdasarkan inti (*core*) indeks biasnya. Untuk serat optik berdasarkan mode yang dirambatkan terbagi atas dua macam yaitu serat optik *singlemode* dan serat optik *multimode*. Perbedaan dari keduanya terletak pada mode cahaya yang dirambatkan. Serat optik *singlemode* memiliki inti dengan diameter 9 mikron yang berfungsi untuk mengirimkan sinyal optik (1300-1550)nm sedangkan serat optik *multimode* mempunyai inti yang lebih besar dari *singlemode* sekitar 62,5 mikron yang berfungsi mengirim sinyal optik (850-1300)nm (Depi Santi Sinuhaji, 2010).



Gambar 2.1. Serat optik *singlemode* dan *multimode*.

Untuk serat optik dari sisi indeks bias core terbagi atas dua macam yaitu *step indeks*: core memiliki indeks bias yang homogen dan *graded indeks*: indeks bias core akan semakin kecil ketika mendekati kearah kulit *cladding* serat optik.

Struktur utama dari fiber optik terdiri atas 3 bagian yaitu *buffer* (pelindung) atau *coating* (mantel), *cladding* (kulit) dan *core* (inti). *Buffer* (pelindung) terbuat dari bahan plastik yang elastis dan berfungsi untuk melindungi inti dan kulit pada serat optik. *Cladding* (kulit) terbuat dari bahan dielektrik seperti silica dengan tanpa atau sedikit doping. Jari-jari dari *cladding* sekitar 125-800 μm dengan indeks biasnya n_2 . *Core* (inti) terbuat dari bahan dielektrik seperti silica SiO_2 yang didoping dengan fosfor penta oksida (P_2O_5) atau germanium oksida (GeO_2). Jari-jari inti sekitar 8-200 μm dengan indeks bias n_1 . Indeks bias inti lebih besar daripada indeks bias kulit ($n_1 > n_2$).



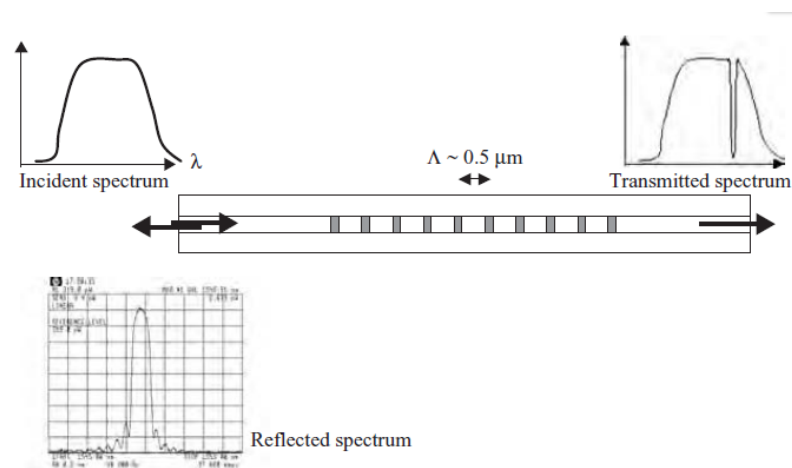
Gambar 2.2. Struktur Fiber Optik (Ahmad Mulia R, 2003).

2.2 Fiber Optik Bragg Grating (FBG)

Pada serat optik yang normal *cladding* dan indeks bias dari serat optik tidak berubah sepanjang serat. Jika ada penyimpangan dari kondisi normal ini maka cahaya pada serat optik akan mengalami hamburan dan mengakibatkan rugi pada serat optik. Berdasarkan sifat dari rugi-rugi yang timbul inilah fiber optik dijadikan sebagai sensor.

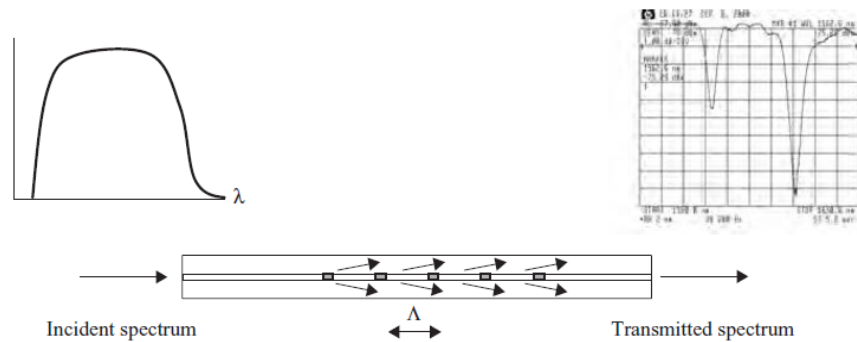
Selain itu ada jenis fiber optik yang disebut sebagai fiber optik kisi yang terbagi atas dua tipe. Tipe pertama disebut fiber optik kisi pendek atau umum dikenal sebagai fiber Bragg Grating (FBG). Pada FBG, jarak antar kisi-kisinya sekitar setengah mikrometer artinya inti serat optik akan mengalami resonansi panjang gelombang yang bervariasi secara berkala sepanjang serat dan memiliki nilai panjang gelombang yang sama setelah setiap setengah mikrometer.

Akibat adanya kisi pada serat optik maka cahaya yang melewati serat optik dengan panjang gelombang tertentu akan ada yang diteruskan dan ada juga yang akan dipantulkan. Hal ini dapat terjadi karena adanya penambahan suatu variasi periodik terhadap indeks bias core serat optik. Dengan karakteristik yang dimiliki oleh serat optik FBG maka memungkinkan digunakan sebagai filter optik. Artinya kita dapat menghalangi panjang gelombang tertentu dari cahaya dan memanfaatkan atau mengambil panjang gelombang tertentu yang kita inginkan. Penggambaran dari fiber optik FBG dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3. Karakteristik FBG-cahaya akan dipantulkan dan dtransmisikan berdasarkan panjang gelombang tertentu (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007).

Tipe kedua dari fiber optik kisi adalah fiber optik kisi panjang atau *Long Period Grating* (LPG). Pada LPG jarak antar kisi-kisi dari indeks biasanya berkisar ratusan mikrometer. Akibatnya cahaya dengan panjang gelombang tertentu akan menyebar dari inti serat dalam arah maju menuju *cladding*. Ilustrasi dari LPG ini terlihat pada Gambar 2.4. berikut:



Gambar 2.4. Karakteristik LPG-cahaya akan menyebar dari inti menuju *cladding* (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007).

2.3 Prinsip Kerja Fiber Optik Bragg Grating (FBG)

Prinsip pengukuran yang digunakan oleh sensor berbasis FBG adalah dengan memantau pergeseran panjang gelombang Bragg. Panjang gelombang Bragg atau kondisi resonansi sebuah grating dapat dinyatakan sebagai;

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (2.1)$$

dimana λ_B adalah panjang gelombang Bragg dari FBG, n_{eff} adalah indeks efektif inti serat yang merupakan perbandingan antara kecepatan cahaya di ruang hampa dengan kecepatan dalam pemandu/serat optik, dan Λ adalah periode kisi-kisi. Periode dan indeks efektif menentukan panjang gelombang Bragg yang akan direfleksikan secara maksimal. Ketika luas pita (*broadband*) cahaya atau satu set panjang gelombang cahaya mengalami kontak dengan kisi serat optik maka hanya panjang gelombang yang sesuai dengan panjang gelombang Bragg yang akan direfleksikan dan lainnya akan ditransmisikan ke luaran (*output*). Panjang gelombang reflektitas maksimum juga disebut sebagai panjang gelombang Bragg

yang besarnya sebanding dengan periode indeks modulasi dan indeks bias serat optik.

Puncak reflektitas dan *bandwidth* $\Delta\lambda$ dari FBG dengan panjang L diberikan oleh:

$$R = \tanh^2 \kappa L \quad (2.2)$$

dan

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_B^2}{n_{eff} L} \left(1 + \frac{\kappa^2 L^2}{\pi^2}\right)^{1/2} \quad (2.3)$$

dimana

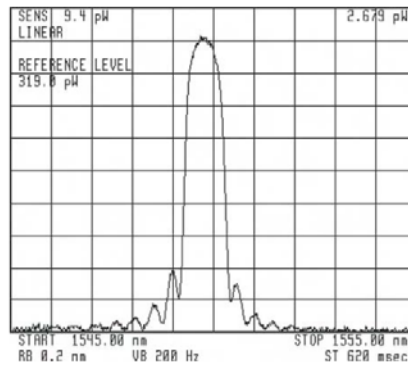
$$\kappa \approx \frac{\pi \Delta n I}{\lambda_B} \quad (2.4)$$

Karena Δn adalah perubahan indeks bias puncak dalam kisi dan I memberikan:

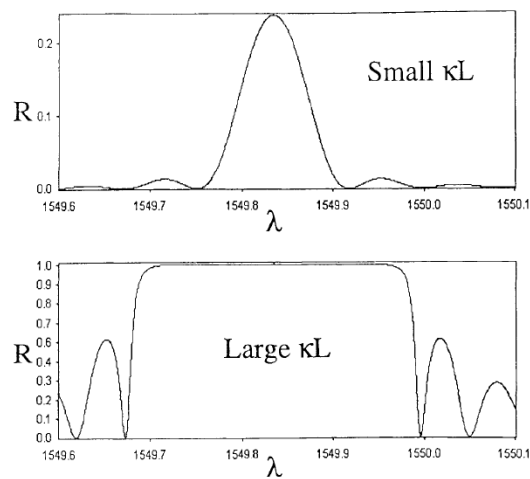
$$I \approx 1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{w^2}\right) \quad (2.5)$$

Dimana a adalah jari-jari dari inti serat, w adalah ukuran daerah Gaussian. Dengan menggunakan persamaan-persamaan diatas kita dapat memperkirakan parameter kisi yang diinginkan untuk mencapai puncak reflektitas dan lebar pita (*bandwidth*) dari serat optik. Sebagai contoh sebuah fiber optik 850 nm dengan jari-jari inti serat $a = 3\mu m$, $NA=0.1$, $n_{eff}=1.4517$ dan $n_2=1.45$ maka jika kita ingin merefleksikan panjang gelombang 850 nm diperlukan periode spasial sebagai berikut:

$$\Lambda = \frac{\lambda_B}{2n_{eff}} \approx 0.293 \mu m \quad (2.6)$$

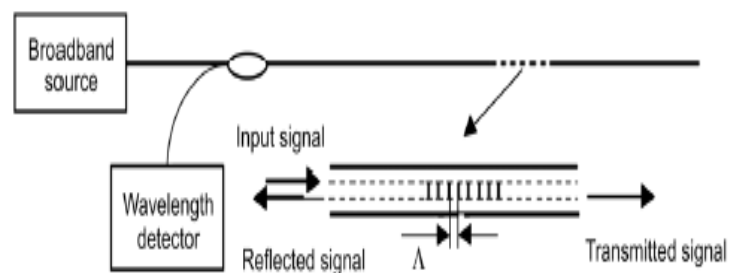


Gambar 2.5. Tipe pengukuran FBG dari spectrum yang direfleksikan (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007).



Gambar 2.6. Tipe spektrum pantulan dari serat optik FBG (Kenneth O. Hill, 2002).

Panjang gelombang yang ditentukan oleh kondisi Bragg akan tercermin pada bagian kisi Bragg. Gambar 2.7 menunjukkan proses ini (Parne Saidi Reddy, 2010)



Gambar 2.7 Diagram skematik dari sensor serat optik FBG (Parne Saidi Reddy, dkk, 2010)

Panjang gelombang Bragg adalah fungsi dari indeks bias inti serat dan periode kisi-kisi. Jika kisi-kisi terkena kondisi lingkungan eksternal, seperti regangan dan suhu maka panjang gelombang Bragg akan ikut berubah. Dengan mengukur pergeseran panjang gelombang $\Delta\lambda$ maka sifat dari material seperti regangan dan suhunya dapat diukur. Berdasarkan prinsip dasar tersebut memungkinkan serat optik FBG dapat digunakan sebagai sensor (Parne Saidi Reddy, dkk, 2010).

Pergeseran panjang gelombang Bragg karena regangan dan suhu dapat dinyatakan sebagai;

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[\left(\frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \Delta T + \left[\left(1 - \left(\frac{n^2}{1} \right) [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right) \varepsilon \right] \right]$$

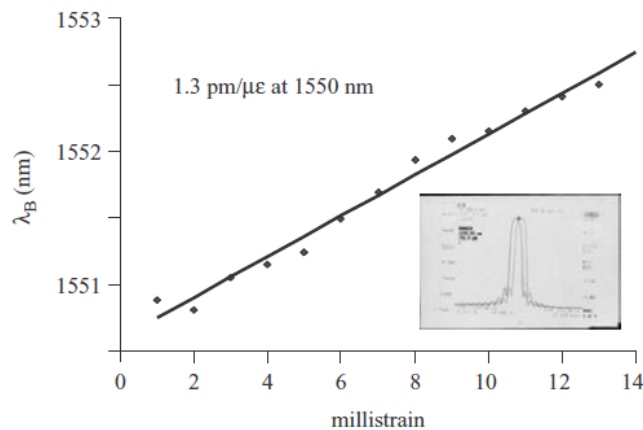
$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f) \Delta T + (1 - P_e) \varepsilon] \quad (2.7)$$

dimana $\alpha_f = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \approx 0,55 \times 10^{-6} / ^\circ C$ adalah koefisien ekspansi termal FBG dari bahan silika, $\xi_f = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \approx 7,64 \times 10^{-6} / ^\circ C$ adalah koefisien termo optik, $p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \approx 0.22$ adalah koefisien regangan optik dari fiber optik, ε adalah regangan. Oleh karena itu perubahan panjang gelombang ($\Delta\lambda_B$) disebabkan oleh perubahan regangan dan efek dari temperatur.

2.4 Sensor Berbasis Fiber Optik Bragg Grating (FBG)

Fiber Bragg Grating (FBG) memiliki potensi yang besar untuk diaplikasikan ke berbagai sensor seperti sensor tekanan, temperatur, mekanik, percepatan, rotasi dan sensor lainnya. Hal ini dikarenakan panjang gelombang Bragg (refleksitas maksimum) tergantung pada indeks bias serat dan periode kisi dari serat. Jika kedua parameter ini diberi perlakuan eksternal yang mengakibatkan perubahan panjang gelombang yang dipantulkan maka dengan mengukur perubahan panjang gelombang yang dipantulkan tersebut kita dapat mengetahui karakteristik dari gangguan eksternal tersebut. Berdasarkan prinsip inilah fiber optik kisi pendek (FBG) dapat digunakan sebagai sensor.

Ketika sebuah serat kisi mengalami regangan maka kisi-kisi akan mengalami perpanjangan yang mengarah ke peningkatan periode kisi-kisinya. Disaat yang sama efek regangan optik juga akan mengakibatkan perubahan pada indeks bias dari serat. Gambar 2.10 menunjukkan variasi panjang gelombang Bragg yang diukur sebagai fungsi regangan memanjang dari kisi-kisi serat.



Gambar 2.8 Variasi pengukuran puncak refleksi panjang gelombang Bragg dengan regangan pada fiber optik (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007)

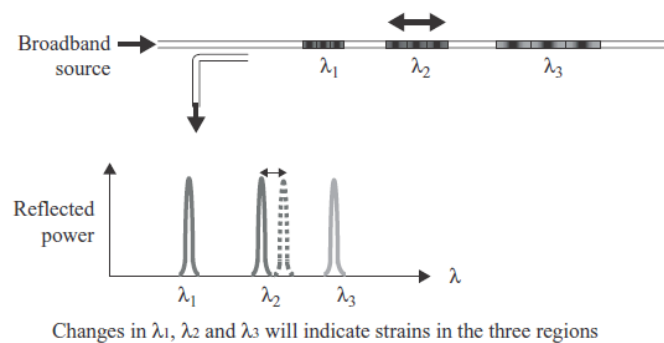
Dari Gambar 2.8 terlihat bahwa sensitifitas regangan dari kisi serat optik adalah $1.3 \text{ pm}/\mu\epsilon$ (pikometer/microstrain) pada panjang gelombang 1550 nm. Hal ini berarti bahwa setiap perubahan 1 *microstrain* akan menghasilkan perubahan panjang gelombang yang dipantulkan sebesar 1.3 pikometer.

Sama halnya ketika akan mengukur temperatur. Karena indeks bias dan periode kisi-kisi akan mengalami perubahan jika dipanaskan maka puncak panjang gelombang Bragg juga akan mengalami perubahan. Sensitifitas suhu dari FBG biasanya $6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ yang berarti bahwa tiap perubahan suhu 1°C akan mengakibatkan perubahan pada panjang gelombang yang dipantulkan sebesar 6 pikometer (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007).

Dari pembahasan diatas dapat dilihat bahwa perubahan panjang gelombang pantul sangatlah kecil sehingga diperlukan teknik khusus untuk mendeteksi/ membaca dengan baik perubahan tersebut. Selain itu dapat dilihat

pula bahwa perubahan panjang gelombang pantul diakibatkan oleh adanya faktor eksternal yang diberikan pada serat optik berupa regangan dan suhu. Didalam melakukan *sensing* penting untuk melakukan pemisahan pengukuran regangan dan temperatur agar didapatkan hasil yang sesuai.

Salah satu atribut penting pada sensor berbasis serat optik FBG adalah dapat *dimultiplexing* menjadi serat tunggal. Sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 2.9 yang menunjukkan susunan yang khas dari sensor yang *dimultiplexing* dimana sejumlah serat optik Bragg grating (FBG) dengan panjang gelombang yang berbeda dibuat di berbagai titik sepanjang serat optik *singlemode*. Sumber Cahaya dengan luas pita (broadband) berbeda digabungkan ke dalam serat dan dengan mengukur perubahan panjang gelombang dari individu-individu serat optik Bragg grating (FBG) maka regangan dan perubahan suhu di setiap titik dapat diukur secara independen.



Gambar 2.9 Serat optik Bragg grating (FBG) yang *dimultiplexing* (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007)

Dibandingkan dengan sensor serat optik lainnya, sensor serat optik Bragg grating (FBG) memiliki beberapa keuntungan antara lain:

- a) Kebal terhadap fluktuasi intensitas sumber cahaya karena sinyal sensor adalah dalam bentuk pergeseran puncak panjang gelombang pantul.
- b) Panjang gelombang Bragg hampir linier dengan fungsi *strain*/regangan dan suhu.
- c) Kisi pada serat dapat diproduksi langsung dan secara massal.
- d) Mudah untuk *dimultiplexing*.

2.5 Komponen Sensor Berbasis Fiber Optik Bragg Grating (FBG)

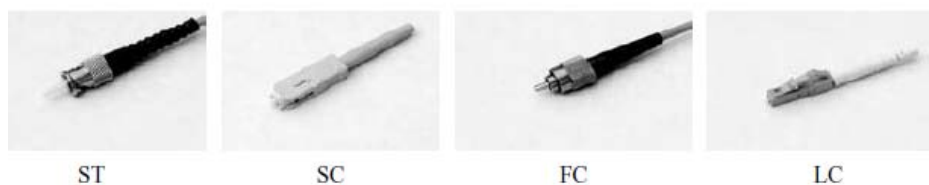
a. Fiber Bragg Grating

Fiber bragg grating merupakan elemen dasar dari sensor berbasis serat optik. Pada penelitian ini digunakan fiber Bragg grating buatan Technica SA asal USA dengan spesifikasi sebagai berikut. Panjang gelombang operasi FBG 1550 nm dengan toleransi panjang gelombang $\pm 0,5$ nm. Panjang FBG adalah 10 mm dengan reflectivity $> 80\%$. Tipe serat optik adalah polymide fiber yang tahan terhadap temperatur 180°C dengan konektor tipe FC/PC.

b. Konektor

Salah satu komponen dasar dari suatu sistem sensor berbasis serat optik adalah konektor. Konektor merupakan komponen yang menghubungkan antara serat optik dengan sumber cahaya atau detektor yang sifatnya dapat dibongkar pasang. Sebuah konektor yang baik ketika inti dari serat sejajar dengan laser atau detektor. Konektor dengan presisi tinggi memiliki nilai toleransi kurang dari $1\text{ }\mu\text{m}$.

Setiap konektor memiliki empat bagian utama yaitu: *ferrule*, batang (tubuh) konektor, kabel, dan perangkat kopling (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007). *Ferrule* merupakan perangkat silinder tipis panjang yang biasanya terbuat dari logam ataupun keramik yang lubangnya dibor melalui pusat silinder. Diameter lubang *ferrule* ukurannya sedikit lebih besar dari diameter *cladding* serat optik sehingga serat optik dapat diposisikan pas didalam *ferrule*. Batang konektor biasanya terbuat dari logam atau plastik yang mengikat *ferrule*. Kabel yang terpasang pada batang konektor berfungsi sebagai titik masuk dari serat optik dan perangkat kopling berfungsi sebagai penyelarasan antara dua serat yang dihubungkan.



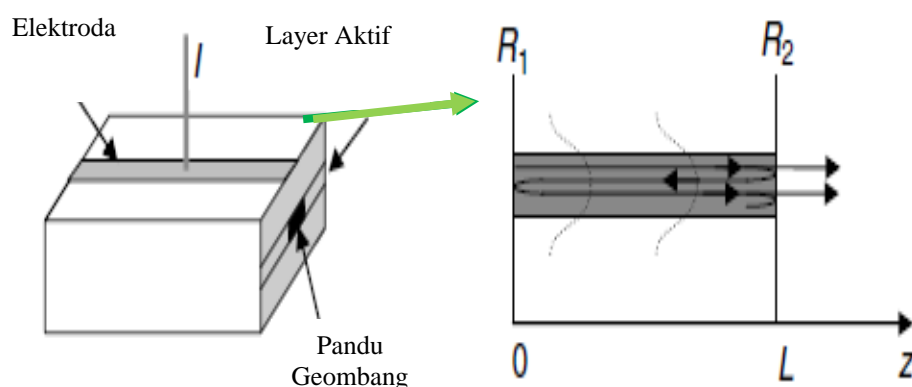
Gambar 2.10. Tipe Konektor Fiber Optik (Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak, 2007)

c. *Laser Dioda (LDs) dan Light-Emitting Diodes (LEDs):*

Didalam sistem optik, sinyal dibawa oleh foton dan oleh karena itu pemilihan sumber optik menjadi salah satu bagian yang penting dalam sistem optik. Meskipun ada berbagai sumber optik namun saat ini yang banyak digunakan adalah sumber cahaya dari bahan semikonduktor. Alasan pemilihannya karena ukurannya kecil, *reliable*, dan luarannya cepat dipengaruhi oleh injeksi arus listrik atau lebih dikenal dengan modulasi langsung (Rongqing Hui, 2009). Laser semikonduktor dan LED didasarkan pada sambungan bias maju p-n *junction* dan daya luaran optiknya sebanding dengan arus injeksi listrik.

Laser Dioda (LDs)

Laser dioda adalah laser dari bahan semikonduktor yang didasarkan pada stimulan emisi bias maju semikonduktor p dan n. LDs memiliki kemurnian spektrum dan efesiensi eksternal yang lebih tinggi. Salah satu persyaratan dasar dari laser dioda adalah umpan balik optik. Pada (Gambar 2.11) memperlihatkan rongga laser dengan panjang L dari bahan semikonduktor, besar keuntungan optik g , dan α adalah kerugian optik per unit panjang. Indeks bias materi dalam rongga n , dan refleksitas dari permukaan rongga adalah R_1 dan R_2 .



Gambar 2.11. Sebuah Rongga Laser
(Hui Rongqing dan Maurice O'Sullivan, 2009)

Gambar 2.11 juga memperlihatkan perjalanan bolak balik dari gelombang cahaya sepanjang arah Z. Setelah tiap bolak balik, gelombang cahaya akan mengalami perubahan bidang optik sebesar:

$$\frac{E_{i+1}}{E_i} = \sqrt{R1}\sqrt{R2} \exp(\Delta G + j\Delta\phi) \quad (2.8)$$

dimana total pergeseran fase dari medan optiknya adalah

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2nL \quad (2.9)$$

dan koefisien keuntungan dari medan optik adalah

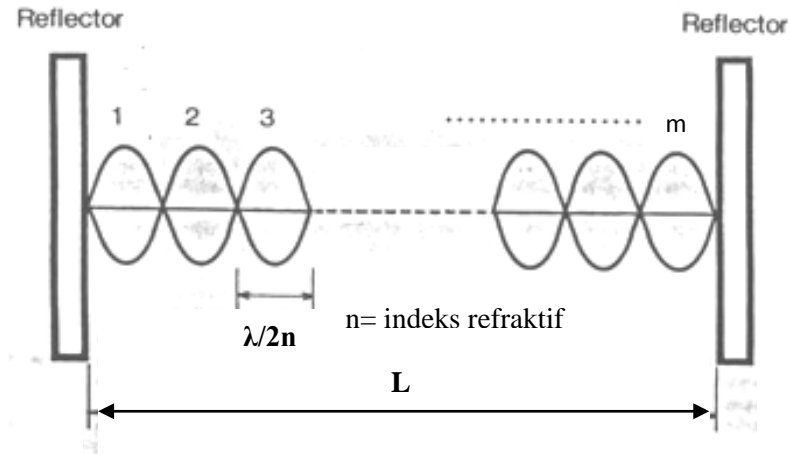
$$\Delta G = (\Gamma g - \alpha) 2L \quad (2.10)$$

dimana g adalah koefisien gain optik (cm^{-1}), α adalah koefisien serap dari bahan semikonduktor (cm^{-1}), $0 < \Gamma < 1$ adalah faktor kurungan yang menyatakan bahwa tidak semua bidang optik dibatasi oleh pandu gelombang, G adalah rasio antara bidang optik dengan medan optik. Agar osilasi dapat berulang secara kontinyu maka harus memenuhi:

$$\sqrt{R1}\sqrt{R2} \exp(\Delta G + j\Delta\phi) = 1 \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) menyatakan syarat terjadinya osilasi dan juga disebut sebagai kondisi ambang batas. Pada kondisi ambang batas bidang optik E_i tidak mengalami pergeseran atau perubahan. Selain itu, agar osilasi dapat berulang secara kontinyu maka gelombang cahaya dikomposisi berdasarkan kondisi fase dari laser. Kondisi fase menyatakan gelombang cahaya yang setiap bergerak bolak balik, perubahan fase gelombang harus kelipatan dari 2π , $\Delta\phi = 2m\pi$ dimana m adalah bilangan bulat positif dengan nilai 1, 2, 3, dan seterusnya. Implikasi dari perubahan fase ini adalah sinar laser dapat memancar di beberapa panjang gelombang yang umum dikenal sebagai mode longitudinal dan memenuhi persamaan berikut.

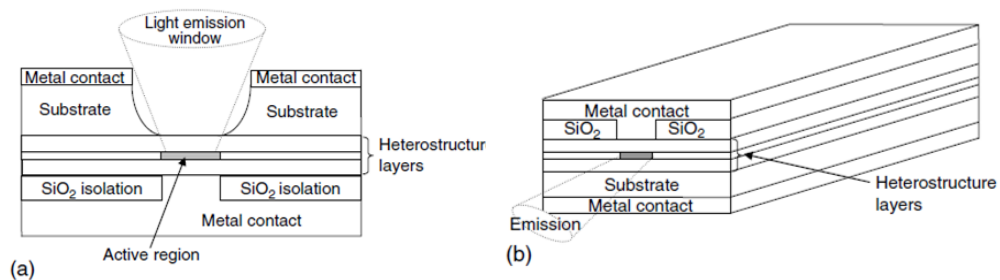
$$\lambda_m = \frac{2nL}{m} \quad (2.12)$$



Gambar 2.12. Gelombang mode longitudinal
(Hui Rongqing dan Maurice O'Sullivan, 2009)

Light-Emitting Diodes (LEDs)

Emisi cahaya pada LED didasarkan pada emisi spontan bias maju semikonduktor p dan n. Struktur dasar dari LEDs ditunjukkan pada Gambar 2.13 (a) pancaran pada permukaan, (b) pancaran pada tepi LED. Untuk dioda dengan surface emitting, cahaya memancar dalam arah tegak lurus dari lapisan aktif. Pola emisi daya optik dapat digambarkan sebagai $p(\theta) = P_0 \cos \theta$ dengan θ adalah sudut yang terbentuk antara arah pancaran dengan permukaan normal. P_0 adalah daya optik dilihat dari permukaan normal.



Gambar 2.13. Ilustrasi emisi permukaan dan emisi tepi dari LED
(Hui Rongqing dan Maurice O'Sullivan, 2009)

d. Optimized Spectrum Analyzer (OSA)

Karakterisasi dan pengujian perangkat optik memerlukan perangkat/ alat dan instrumen tertentu. Pemahaman yang baik tentang prinsip prinsip dasar dari berbagai alat/instrumen, spesifikasi alat, kelebihan, dan keterbatasan dari alat akan membantu dalam merancang sebuah setup eksperimental, mengoptimalkan prosedur pengujian dan meminimalkan kesalahan dalam pengukuran.

Salah satu perangkat alat dalam sistem sensor berbasis fiber optik adalah *Optimized Spectrum Analyzer (OSA)*. OSA adalah alat yang digunakan untuk mengukur kepadatan spektrum dari sinyal gelombang cahaya pada panjang gelombang yang berbeda. Hui Rongqing dan Maurice O'Sullivan dalam bukunya "*Fiber Optic Measurement Techniques*" mengatakan bahwa sebuah OSA yang baik memiliki spesifikasi dengan parameter sebagai berikut:

1. Rentang Panjang Gelombang

Rentang panjang gelombang merupakan parameter yang mengandung makna bahwa OSA memiliki kerja pada rentang panjang gelombang tertentu. Jadi tidak semua panjang gelombang dapat dibaca oleh OSA. Biasanya panjang gelombang tersebut juga bergantung pada filter optik, photodetektor, dan perangkat optik lainnya. Rentang panjang gelombang yang tersedia dalam bentuk kisi berbasis OSA adalah 400-1700 nm.

2. Akurasi panjang gelombang

Akurasi panjang gelombang kaitannya dengan seberapa akurat OSA dalam mengukur suatu panjang gelombang tertentu. Kebanyakan OSA yang ada mengukur panjang gelombang absolut dan relatif secara terpisah. Akurasi panjang gelombang absolut menentukan seberapa akurat nilai panjang gelombang ukur yang sering dipengaruhi oleh kalibrasi panjang gelombang. Sementara akurasi panjang gelombang relatif menggambarkan bagaimana akurasi dari pemisahan panjang gelombang yang diukur diantara dua sinyal optik dan biasanya sangat ditentukan oleh filter pada optik. Akurasi panjang gelombang biasanya kurang dari 0,1 nm.

3. Resolusi Lebar Pita (*Bandwidth*)

Akurasi lebar pita (*bandwidth*) adalah keadaan dari irisan spektrum sinyal optik yang terbaca pada OSA selama pengukuran. Semakin kecil resolusi *bandwidth* dari sinyal optik berarti semakin rinci karakteristik dari sinyal tersebut. Resolusi *bandwidth* dari OSA berbasis kisi yang terbaik untuk saat ini adalah 0,1 nm sampai 0,01 nm.

4. Sensitifitas

Sensitifitas erat kaitannya dengan menentukan daya optik minimum yang terukur sebelum ada *noise*/ gangguan. Oleh karena itu deteksi sensitifitas pada dasarnya ditentukan oleh karakteristik noise dari dioda yang digunakan pada OSA. Untuk OSA yang kemampuan mendeteksi panjang gelombang yang pendek (400-1000) nm umumnya memiliki sensitifitas yang lebih baik dibanding OSA yang mendeteksi panjang gelombang 1000-1700 nm. Selama ini sensitifitas dari OSA yang mampu dideteksi adalah -120 dB pada kisaran panjang gelombang 400-1700 nm.

5. Daya Maksimum

Daya maksimum adalah kemampuan OSA dalam mendeteksi daya optik maksimum suatu masukan sebelum mengalami saturasi. Pada umumnya OSA mampu mentolerir sinyal daya optik 20dBm atau lebih.

6. Akurasi Kalibrasi

Akurasi kalibrasi dari OSA merupakan kemampuan OSA didalam membaca tingkat keakuratan pada saat melakukan pengukuran. Biasanya akurasi kalibrasi kurang dari 0,5 dB yang dapat dicapai oleh OSA.

7. Stabilitas Amplitudo

Stabilitas amplitudo kaitannya dengan penentuan fluktuasi maksimum dari daya optik dari waktu ke waktu ketika input dayanya dikonstankan. Stabilitas amplitudo pada OSA biasanya kurang dari 0,01 dB per menit.

8. Rentang Dinamis

Rentang dinamis adalah melakukan identifikasi amplitudo maksimum dari dua sinyal optik dengan panjang gelombangnya masing-masing secara terpisah. Hal ini menjadi penting karena pada prakteknya jika sinyal optik lemah berada disekitar sinyal optik yang kuat maka sinyal optik yang lemah kadangkala

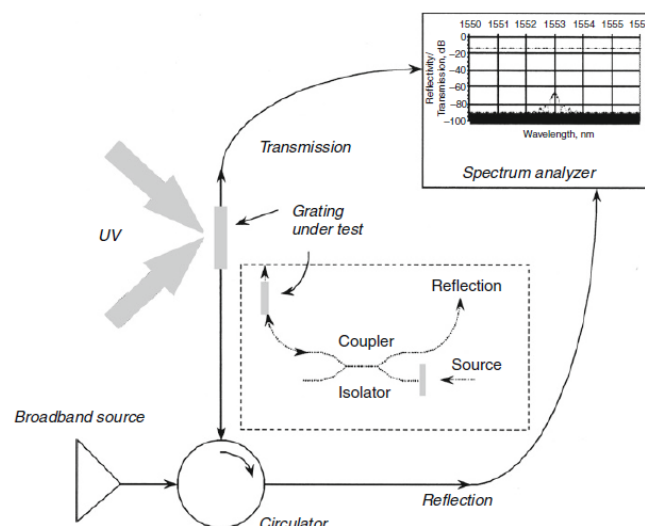
tidak terukur. Oleh karena itu melakukan identifikasi dan pemisahan dari kedua gelombang ini menjadi keharusan didalam pengukuran. Rentang dinamis dari OSA adalah sekitar 60 dB untuk selang panjang gelombang 0,8 nm dan 52 dB untuk selang panjang gelombang 0,2 nm.

9. Frekuensi *sweep rate*

Frekuensi *sweep rate* adalah kecepatan OSA didalam menyapu panjang gelombang selama pengukuran. Hal ini tergantung pada rentang panjang gelombang pengukuran dan resolusi bandwidth yang digunakan. Umumnya untuk menentukan banyaknya sapuan ditentukan dengan membagi rentang dinamis dengan resolusi bandwidthnya. Selain itu pada prakteknya didalam memilih kecepatan sapuan juga ditentukan oleh tingkat kekuatan dari sinyal masukan.

10. Ketergantungan polarisasi

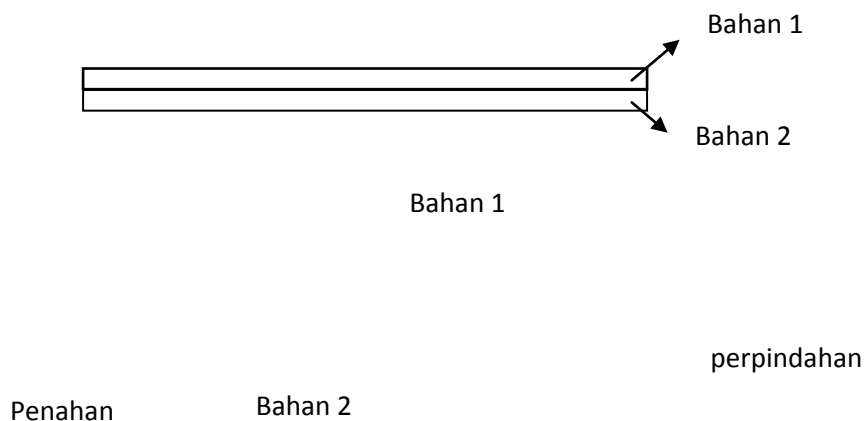
Menentukan fluktuasi maksimum dari pembacaan daya saat sinyal optik mengalami polarisasi. Ketergantungan polarisasi disebabkan oleh polarisasi transmisi yang tergantung pada sistem optik: kisi dan filter optik yang digunakan didalam OSA.



Gambar 2.14. Skema pengukuran sinyal refleksi dan transmisi pada fiber bragg (Raman Kashyap, 2009)

2.6 Struktur dan Prinsip Pengukuran Sensor Temperatur Berbasis FBG Tipe Bimetal

Bimetal yang digunakan sebagai komponen sensor temperatur terdiri dari dua bahan/material berbeda yang ditempelkan secara bersama sama. Pemilihan kedua bahan berdasarkan pada koefisien ekspansi termal yang dimiliki oleh masing-masing bahan. Sebagai contoh koefisien ekspansi termal dari besi dan aluminium masing-masing adalah $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ dan $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.



Gambar 2.15 Struktur dari bimetal

Prinsip kerja bimetal menggunakan konsep pemuaian akibat perbedaan koefisien ekspansi termal dari bahan penyusunnya. Bimetal peka terhadap perubahan suhu, ketika keping bimetal dipanaskan atau dinaikan suhunya, maka akan melengkung ke arah logam yang memiliki angka koefisien ekspansi termalnya kecil. Sebaliknya jika bimetal didinginkan, keping bimetal akan melengkung ke arah logam yang angka koefisien ekspansi termalnya besar

Seperti yang telah dikemukakan sebelumnya bahwa kondisi Bragg dinyatakan sebagai $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa panjang gelombang Bragg λ_B sangat tergantung pada indeks bias efektif inti serat n_{eff} , dan periode kisi-kisi Λ . Pengaruh temperatur akibat regangan didominasi oleh faktor termo-optik sebesar 95% dari serat optik. Hubungan pergeseran panjang gelombang akibat pengaruh temperatur dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \alpha_f + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \quad (2.13)$$

dengan $\xi_f = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT}$ adalah koefisien termo optik, dan α_f adalah koefisien ekspansi termal dari bahan. Sementara hubungan pergeseran panjang gelombang akibat pengaruh regangan dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [1 - p_e] \varepsilon \quad (2.14)$$

dengan ε adalah regangan, p_e adalah koefisien efektif fotoelastis bahan dengan nilai sebesar $p_e = \left(\frac{n^2}{2}\right) [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \approx 0.22$, p_{ij} adalah koefisien serat Pockel's dan μ adalah rasio Poisson. Untuk serat optik FBG yang terbuat dari silica dengan doping germanium $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, rasio Poisson $\mu = 0,16$ dan $n_{eff} = 1,482$.

Ketika serat optik FBG diikat/dilem pada permukaan salah satu bahan dari bimetal kemudian dipanaskan maka akan timbul perubahan temperatur ΔT pada bimetal. Karena dilakukan pemanasan pada bimetal secara kontinyu maka bimetal akan mengalami perubahan regangan $\Delta\varepsilon$. Akibat dari perubahan besaran fisis ΔT dan $\Delta\varepsilon$ tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan panjang gelombang $\Delta\lambda_B$ pada serat optik FBG yang menempel pada bimetal. Besar perubahan pergeseran panjang gelombang $\Delta\lambda_B$ dinyatakan dengan persamaan (2.15).

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \quad (2.15)$$

dengan $K_\varepsilon = [1 - p_e]$ dan $K_T = [\alpha_f + \xi_f]$ masing-masing adalah sensitifitas regangan dan sensitifitas temperatur dari serat optik FBG.

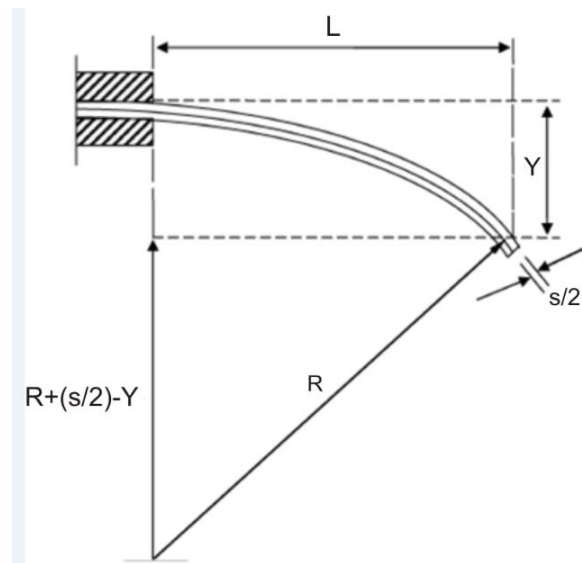
Perubahan regangan $\Delta\varepsilon$ pada bimetal yang mempengaruhi perubahan panjang gelombang $\Delta\lambda_B$ timbul akibat adanya variasi temperatur pada bimetal. Oleh karena itu, terdapat hubungan antara perubahan regangan $\Delta\varepsilon$ dengan variasi temperatur ΔT . Suatu bimetal yang pada kondisi awal lurus dengan temperatur T_0

akan melengkung jika temperatur diubah menjadi T seperti terlihat pada Gambar 2.16. Besar jari-jari/ radius kelengkungan dari bimetal adalah:

$$\frac{1}{R} = \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)(1 + m)^2}{s[3(1 + m)^2 + (1 + m \cdot n)(m^2 + \frac{1}{m \cdot n})]} \quad (2.16)$$

dengan R = radius kelengkungan bimetal, m = perbandingan tebal kedua bahan bimetal, s_1/s_2 , n = perbandingan modulus elastis, E_1/E_2 , s = tebal bahan bimetal, $s_1 + s_2$, α_1, α_2 = koefisien ekspansi termal bahan 1 dan bahan 2. Pada bimetal yang standar nilai $s_1/s_2 = 1$ dan $(n+1) \cdot n = 2$ sehingga persamaan (2.16) dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{1}{R} = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)}{2 \cdot s} \quad (2.17)$$



Gambar 2.16. Lengkungan dari bimetal

Ketika bimetal mengalami perubahan temperatur maka bimetal akan melengkung sepanjang Y dan dari kelengkungan tersebut diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\left(R + \frac{s}{2}\right)^2 = \left(R + \frac{s}{2} - Y\right)^2 + (L)^2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{2Y}{L^2 + Y^2 - Y.s} \quad (2.18)$$

Oleh karena $Y.s$ sangat kecil dan $L \gg Y$ maka $Y.s$ dan Y^2 dapat diabaikan sehingga persamaan (2.18) menjadi:

$$\frac{1}{R} = \frac{2Y}{L^2} \quad (2.19)$$

dengan memasukkan persamaan (2.17) kedalam persamaan (2.19) maka akan diperoleh:

$$Y = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)L^2}{4.s}$$

$$Y = \frac{3(\Delta\alpha)(\Delta T)L^2}{4.s} \quad (2.20)$$

dimana Y adalah defleksi yang dihasilkan pada bimetal dengan panjang L akibat temperatur. Akibat defleksi ini maka FBG akan dikenakan perubahan *strain* sebesar:

$$\Delta\varepsilon = \frac{Y}{L} = \frac{3(\Delta\alpha)(\Delta T)L^2}{4.s.L}$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{Y}{L} = \frac{3(\Delta\alpha)(\Delta T).L}{4.s} \quad (2.21)$$

dengan memasukkan persamaan (2.21) kedalam persamaan (2.20) maka akan diperoleh persamaan besar perubahan panjang gelombang Bragg akibat pengaruh temperatur pada serat optik FBG yang diikat/dilem pada permukaan bimetal.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \left[\frac{3L}{4.s} \Delta\alpha \Delta T_{bimetal} \right] + K_T \Delta T_{FBG} \quad (2.22)$$

dimana L = panjang bimetal dan s = tebal bimetal. Dari persamaan (2.22) terlihat bahwa terdapat dua variasi temperatur yaitu perubahan temperatur pada bimetal dan perubahan temperatur pada serat optik FBG. Nilai keduanya berbeda akibat adanya *loss* pada saat terjadi transfer panas dari bimetal ke serat optik FBG. Selain itu dari persamaan (2.22) terlihat bahwa hubungan antara pergeseran panjang gelombang Bragg dengan perubahan temperatur adalah linier (Mohd Afiq Ismail, dkk, 2011). Sementara jika hanya menggunakan sebuah metal maka persamaan pergeseran panjang gelombang Bragg menjadi $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon[\alpha\Delta T_{metal}] + K_T\Delta T_{FBG}$. Untuk hasil penelitian yang menggunakan sebuah metal diperoleh nilai sensitifitas 16,65 pm/ $^{\circ}$ C (Fristya,2015).

2.7 Kalibrasi Alat Ukur/ Sensor

Setiap instrumen alat ukur atau sensor sebelum digunakan secara massal, terlebih dahulu harus diuji cobakan untuk melihat keakuratan dari sensor yang telah dibuat. Selain itu setelah dilakukan uji coba maka karakteristik dari sensor dapat ditentukan. Proses uji coba tersebut dinamakan dengan kalibrasi alat ukur/ sensor. Pada umumnya kalibrasi merupakan proses menyesuaikan luaran dari alat ukur/ sensor agar sesuai dengan nilai besaran dari standar yang digunakan dalam akurasi tertentu.

Kalibrasi perlu dilakukan sebagai proses verifikasi bahwa akurasi suatu alat ukur/ sensor telah sesuai dengan rancangannya. Sedangkan menurut ISO/IEC Guide 17025 adalah serangkaian kegiatan yang membentuk hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh instrumen alat ukur atau sistem pengukuran dengan nilai-nilai yang sudah diketahui yang berkaitan dari besaran yang diukur dalam kondisi tertentu.

Proses kalibrasi dari sensor dapat menggunakan beberapa cara diantaranya: 1) Membandingkan sensor yang telah dibuat dengan alat ukur yang telah terstandar baik Nasional maupun Internasional. 2) Menggunakan metode statistik (melakukan pengukuran secara berulang ulang). 3) Menggunakan metode

simulasi. Dari beberapa cara kalibrasi, yang umum dilakukan adalah cara pertama yaitu dengan membandingkan hasil pengukuran dari sensor yang telah dibuat dengan alat ukur yang telah terstandar.

2.8 Menentukan Kesalahan dalam Pengukuran

Pada saat akan mengukur suatu besaran fisis maka akan didapatkan suatu nilai untuk besaran fisik sebagai hasil pengukuran. Hasil pengukuran biasanya tidak persis sama dengan besaran fisik yang sebenarnya. Dalam setiap pengukuran terdapat berbagai kesalahan mengenai hasil ukur sehingga hasil ukur berbeda dengan nilai sebenarnya. Besar dari kesalahan tersebut tergantung berbagai faktor misalnya: berapa baik alat yang digunakan, berapa teliti orang yang mengukur, faktor lingkungan, angin atau getaran yang mengganggu pengukuran dan lain sebagainya. Perbedaan antara hasil pengukuran dan besaran yang sebenarnya disebut sebagai ralat ukur. Untuk mendapatkan hasil pengukuran yang baik kita harus berusaha supaya ralat ukur kecil sehingga hasil pengukuran pasti dekat dengan harga besaran yang sebenarnya.

Ralat ukur adalah perbedaan antara hasil ukur dengan nilai yang sebenarnya. Untuk mengetahui berapa besar ketidakpastian dari hasil ukur, maka harus diperkirakan besar ralat ukur. Dengan kata lain, untuk setiap pengukuran selain hasil ukur juga ralat dari hasil ukur harus ditentukan. Secara umum sistematika penulisan laporan pengukuran adalah:

$$x = (x_0 \pm \Delta x) [x] \quad (2.23)$$

dengan:

x = besaran yang diukur $[x]$ = satuan besaran fisis x

$(x_0 \pm \Delta x)$ = hasil ukur dan ketidakpastiannya

Untuk melihat sejauhmana ketelitian alat ukur yang digunakan maka dapat dilihat dengan menggunakan:

$$\% \text{ error} = \left| \frac{(\text{Hasil teori} - \text{hasil praktikum})}{\text{Hasil teori}} \right| \times 100\% \quad (2.24)$$

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Jenis dan Tempat Penelitian

Jenis penelitian yang dilakukan merupakan jenis penelitian laboratorium dan tempat penelitian di Laboratorium Fisika Instrumentasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini diantaranya adalah fiber optik jenis *Fiber Bragg Grating* (FBG) tipe *polymide fiber* dengan panjang gelombang 1550 nm dan tipe konektor FC/PC. Kemudian bimetal yang terdiri atas dua bahan yang berbeda. Bahan yang diusulkan adalah kombinasi aluminium dan tembaga. *Heater* sebagai sumber panas, termokopel tipe K *Chromel* (Ni-Cr alloy)/ *Alumel* (Ni-Al alloy) sebagai kalibrator temperatur, serat optik *singlemode*, sumber laser *Amplified Spontaneous Emission* (ASE), termometer digital, slide regulator, lem *silicon red merk dextone*, *software origin 9.1*, *Optical Spectrum Analyzed* (OSA) merek Agilent.

3.3. Parameter Observasi

a. Temperatur T ($^{\circ}\text{C}$)

Dalam penelitian ini salah satu besaran yang mempengaruhi perubahan regangan adalah temperatur (T). Ketika bimetal dipanasi dengan *heater* maka lapisan bimetal akan mengalami perubahan regangan akibat perubahan temperatur. Dengan melakukan observasi terhadap temperatur maka dapat dilihat hubungannya terhadap perubahan regangan pada bimetal.

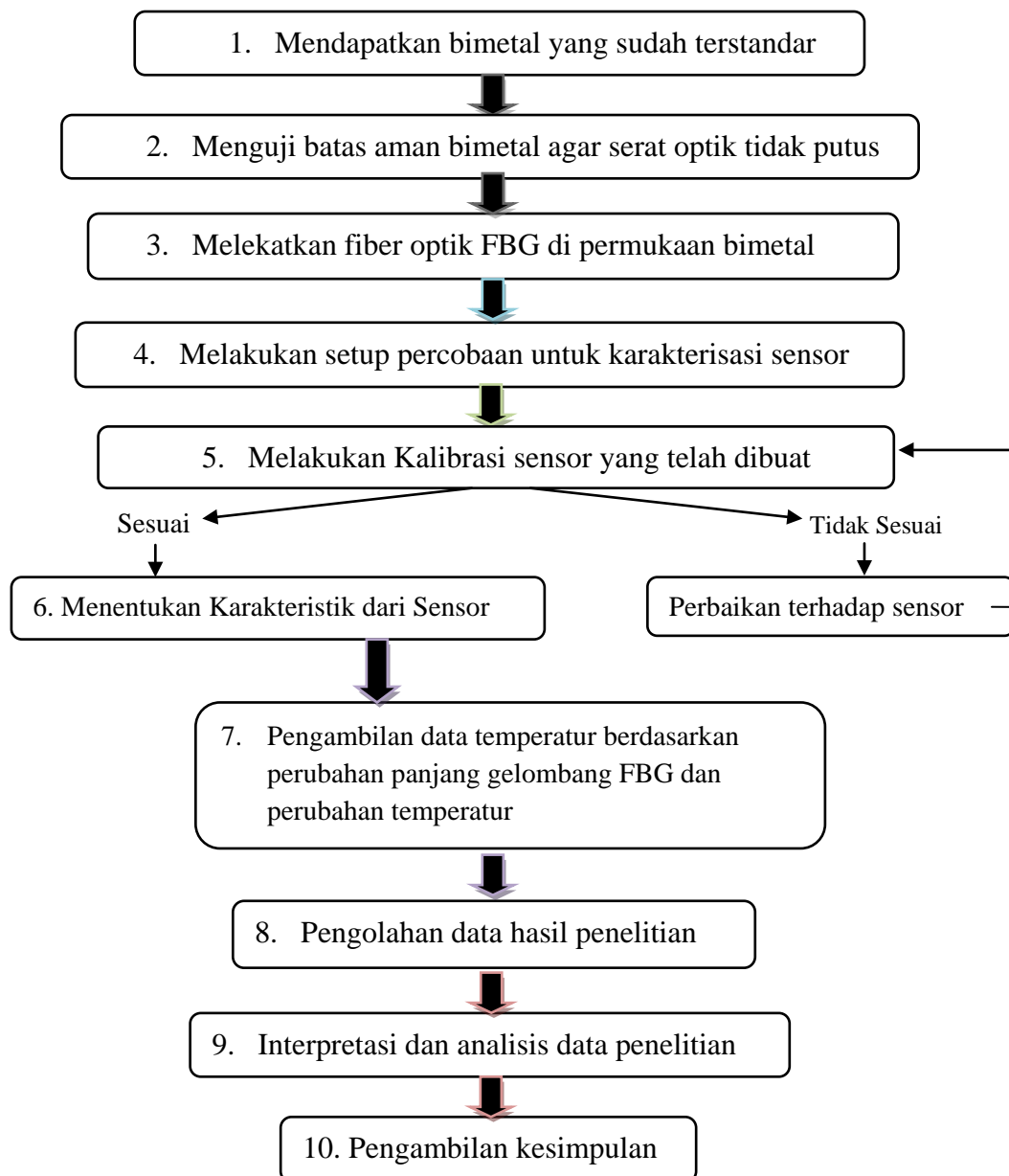
b. Perubahan/pergeseran panjang gelombang Bragg ($\Delta\lambda_B$)

Akibat perlakuan pemberian tekanan dan pemanasan pada bimetal maka akan menimbulkan perubahan regangan. Selain itu, berdasarkan persamaan (2.22) dapat dilihat bahwa akibat perubahan regangan tersebut maka akan

mengakibatkan perubahan/pergeseran panjang gelombang dari sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal yang terukur.

3.4. Prosedur Penelitian

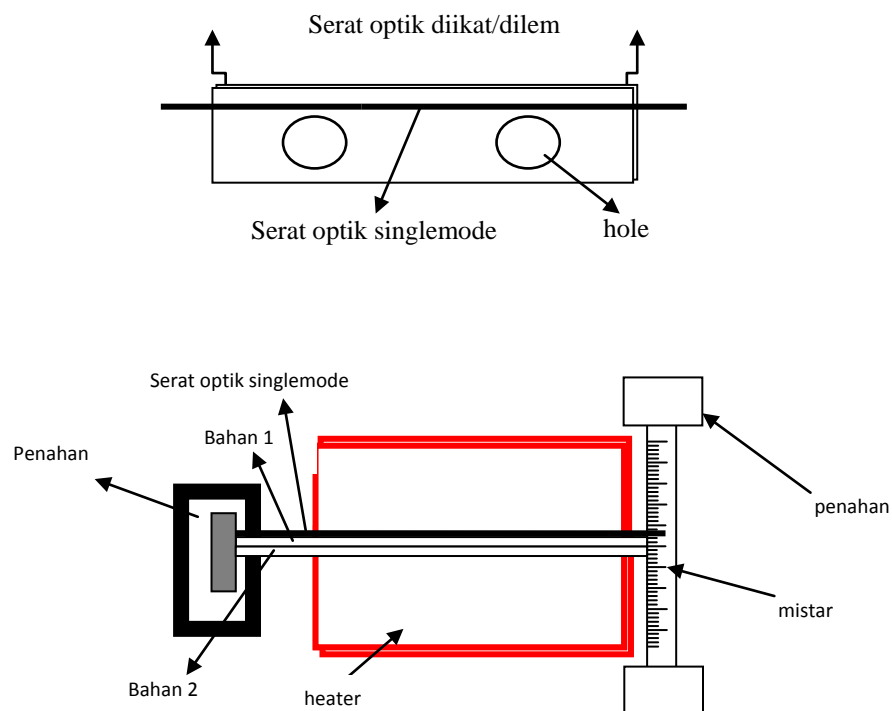
Penelitian ini meliputi beberapa tahap pelaksanaan. Secara garis besar tahapan penelitian ini dibuat dalam bentuk diagram alir pada (Gambar 3.1) berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

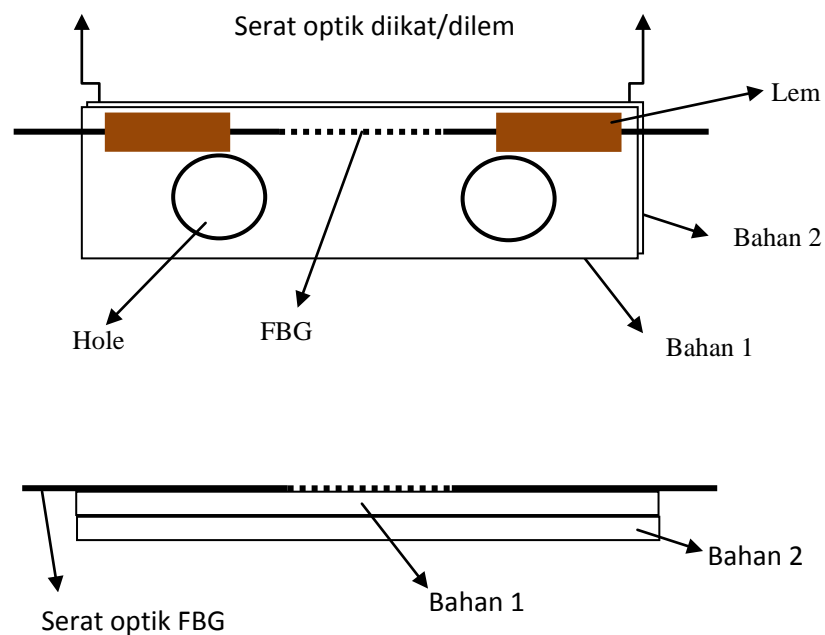
Tahapan penelitian ini dimulai dengan mendapatkan bimetal yang sudah standar dan terkarakterisasi, menguji *safety* bimetal dalam hal ini akan diuji batas maksimum dari kelengkungan bimetal akibat temperatur agar serat optik tidak putus, mendesain *head/probe* sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal, membuat *set up* percobaan untuk karakterisasi sensor, dan melakukan pengujian sensor dengan membuat rangkaian eksperimen. Pengamatan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah melihat dan mencatat pergeseran panjang gelombang Bragg dari sensor akibat perubahan temperatur dan regangan yang diberikan pada sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal.

Tahap awal dalam penelitian ini yaitu memperoleh bimetal dengan berbagai kombinasi bahan yang sudah terstandar dan memiliki karakteristik yang jelas. Setelah bimetal diperoleh maka kemudian akan diuji batas maksimum kelengkungan dari bimetal agar serat optik FBG tidak putus. Untuk menguji hal tersebut digunakan serat optik singlemode yang memiliki diameter dan bahan yang sama dengan FBG dilem di permukaan bimetal. Selanjutnya salah satu ujung bimetal akan diberi penahan dan dipanaskan menggunakan heater. Ilustrasi percobaan terlihat pada (Gambar 3.2).



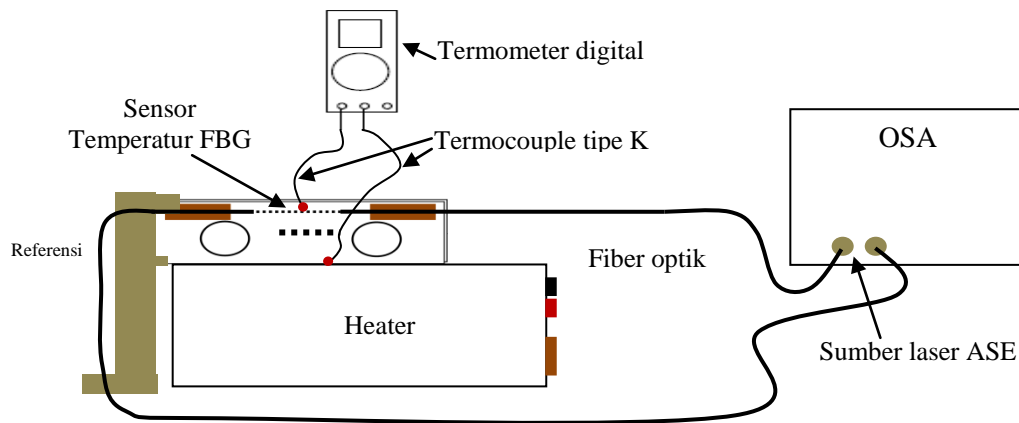
Gambar 3.2 Skema pengujian pergeseran bimetal terhadap temperatur

Setelah mengetahui batas aman dari kelengkungan bimetal maka selanjutnya adalah mendesain *head/probe* sensor. dalam hal ini fiber optik FBG akan diletakkan di atas permukaan dari bimetal dan dilem/direkatkan pada bimetal seperti terlihat pada (Gambar 3.3). FBG dilem dengan menggunakan lem *silicon red merk dextone* yang memiliki daya rekat yang kuat dan ketahanan terhadap temperatur sampai 343 °C. Selain dilem FBG akan diikat menggunakan *port-port* yang sudah dilubangi di masing-masing ujung bimetal.



Gambar 3.3 Struktur *head* sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal

Tujuan dari pengikatan fiber optik FBG ke bimetal agar ketika bimetal dipanaskan maka bimetal akan mengalami regangan dan fiber optik FBG akan melakukan respon karena terikat dan bersentuhan langsung dengan bimetal. Sebelum melakukan karakterisasi sensor terlebih dahulu akan diuji *safety* dari bimetal terhadap serat optik FBG. Setelah sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal selesai dibuat, selanjutnya adalah melakukan karakterisasi sensor. Set up percobaan untuk karakterisasi sensor dapat dilihat pada (Gambar 3.4) berikut.



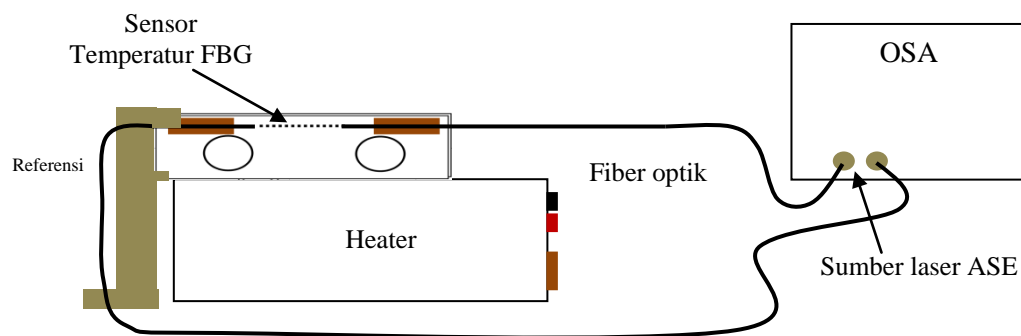
Gambar 3.4 Setup Percobaan untuk karakterisasi sensor

Pertama-tama Seperti terlihat pada (Gambar 3.4) penelitian ini menggunakan kalibrasi dengan membandingkan hasil ukur antara sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal dengan hasil ukur dari alat yang sudah terstandar yaitu termokopel tipe K. Pemilihan termokopel sebagai kalibrator oleh karena selain harganya yang murah, juga tersedia untuk rentang pengukuran -200°C sampai dengan 1200°C . Luaran dari proses kalibrasi sensor selain untuk menentukan keakurasian dari sensor, juga karakteristik yang dimiliki oleh sensor dapat ditentukan seperti sensitifitas sensor, linieritas, *repeatability*, rentang pengukuran, dan berbagai karakteristik lainnya.

Jika selama pengukuran hasil yang didapatkan belum sesuai maka akan dilakukan perbaikan-perbaikan pada sensor dan melakukan pengukuran kembali agar didapatkan hasil yang sesuai dengan hasil pengukuran dari alat ukur yang terstandar.

Setelah melakukan proses karakterisasi sensor dan hasilnya telah sesuai dengan yang diharapkan maka selanjutnya adalah membuat rangkaian percobaan seperti terlihat pada Gambar (3.5). Pertama-tama sumber cahaya berupa laser dengan panjang gelombang 1550 nm ditembakkan ke fiber optik. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser diode dengan panjang gelombang 1550 nm . Ketika gelombang sampai pada kisi FBG maka sebagian gelombang akan diteruskan dan sebagian lagi akan dipantulkan. Gelombang yang diteruskan inilah yang akan terbaca pada OSA dan dicatat sebagai data panjang gelombang awal.

Berdasarkan teori ketika sensor diberikan perlakuan seperti dipanasi atau diberi tekanan maka akan mengakibatkan perubahan panjang gelombang yang dipantulkan akibat dari perubahan jarak antar kisi-kisi dari FBG. Perubahan panjang gelombang yang ditransmisikan tersebut merupakan representasi dari sifat material yang akan diukur seperti suhu dan regangan. Sifat inilah yang menjadi prinsip dasar fiber optik FBG dapat dijadikan sebagai sensor.



Gambar 3.5 Setup Ekperimen

Pada penelitian ini bagian bawah bimetal dipanasi dengan menggunakan *heater*. Ketika bimetal dipanaskan maka akan menimbulkan pemuaiian pada bimetal akibatnya bimetal akan menekuk (dalam orde mm) dan menyebabkan regangan pada serat optik FBG. Dengan mencatat pergeseran panjang gelombang akibat perubahan regangan yang ditimbulkan pada bimetal maka karakteristik berupa temperatur pada bimetal dapat diketahui. Pada penelitian ini akan diulang sebanyak beberapa kali dengan kondisi awal temperatur dinaikkan kemudian diturunkan. Hal ini dilakukan untuk menguji *repeatability* dari sensor.

3.5. Pengolahan, Interpretasi dan Analisis Data dari Sensor Temperatur Berbasis FBG Tipe Bimetal

Pengolahan data dari sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal adalah dengan mencatat pergeseran panjang gelombang dari laser yang terbaca oleh OSA dan juga mencatat perubahan temperatur. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan

besar perubahan panjang gelombang Bragg berdasarkan persamaan (2.25) dan membandingkannya dengan hasil yang didapat dari OSA.

Setelah melakukan pengolahan data, akan dilakukan interpretasi data serta analisis data hasil penelitian berupa grafik hubungan antara pergeseran panjang gelombang yang terukur $\Delta\lambda_B$ (nm) dengan temperatur T ($^{\circ}\text{C}$). Berdasarkan grafik tersebut akan dilihat beberapa karakteristik dari sensor seperti gradien, error pengukuran, sensitifitas dan linieritas dari sensor temperatur fiber optik FBG tipe bimetal.

Pembahasan hasil penelitian akan disajikan secara deskriptif kuantitatif yaitu membandingkan hasil yang diperoleh antara nilai pengukuran dengan nilai yang diperoleh dari persamaan yang telah ada. Dengan demikian dapat diketahui bahwa sensor berbasis fiber Bragg grating (FBG) tipe bimetal dapat digunakan sebagai sensor temperatur.

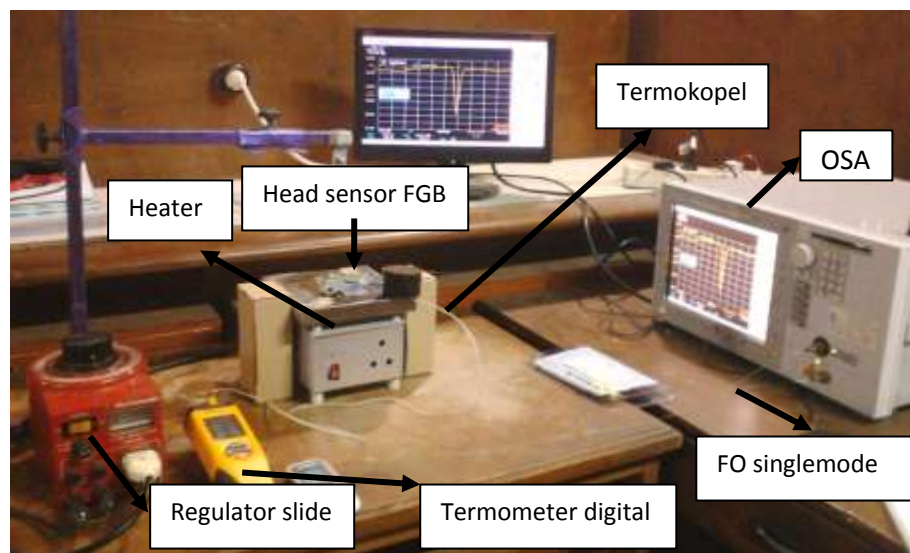
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

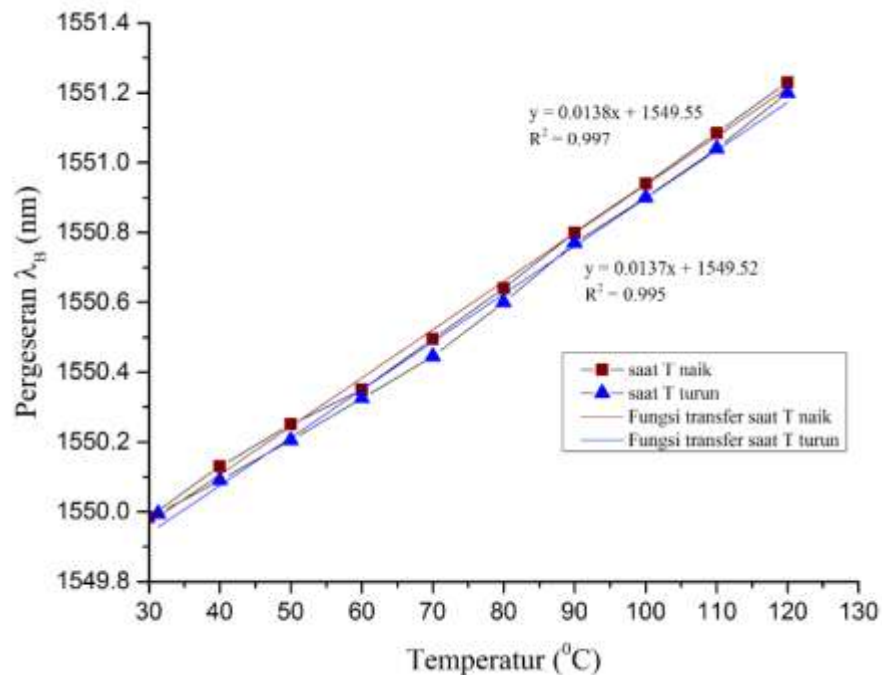
4.1 Hasil Pengujian Karakteristik dari Fiber Bragg Grating (FBG) Terhadap Temperatur.

Fiber Bragg grating yang digunakan dalam penelitian ini adalah FBG yang bahannya terbuat dari *polymide*. Untuk pengujian karakteristik FBG terhadap temperatur dilakukan dengan cara memanaskan FBG pada *heater* dan mengukur pergeseran panjang gelombang Bragg yang timbul akibat perubahan temperatur. Realisasi rangkaian pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut;



Gambar 4.1 Realisasi rangkaian pengukuran karakteristik FBG terhadap temperatur

Pengukuran dilakukan sebanyak 5 kali dengan rentang pengukuran 30 °C sampai dengan 120 °C. Pengukuran dilakukan tiap kenaikan maupun penurunan 10 °C dengan mengatur tegangan masukan (110 Volt) pada *heater* dengan menggunakan slide regulator. Fungsi transfer dari pengukuran memenuhi persamaan $\lambda_B = aT + \lambda_{B0}$ dengan a adalah *slope* (kemiringan) temperatur dan λ_{B0} adalah *zero offset*. Grafik hasil kalibrasi dari hubungan antara perubahan temperatur ΔT terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg $\Delta \lambda_B$ dapat dilihat pada Gambar 4.2.

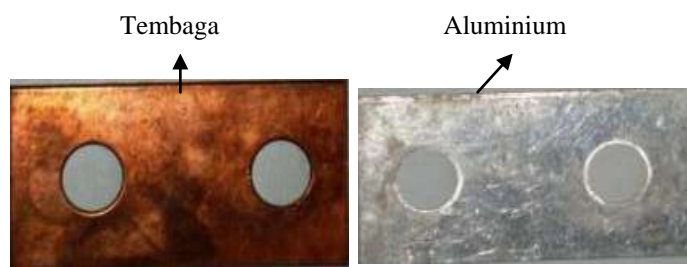


Gambar 4.2 Grafik kalibrasi karakteristik FBG terhadap temperatur

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa fungsi transfer yang diperoleh adalah $\lambda_B = 0,013T + 1549,55$. Dari fungsi transfer diperoleh besar sensitifitas sensor yang dihasilkan adalah $0,013 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ atau $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ dengan *intercept* sebesar $1549,55 \text{ nm}$. Hasil perhitungan selengkapnya pada lampiran B3 dan B1 juga didapatkan nilai histeresis dan error estimasi masing-masing sebesar $0,5$ pada saat temperatur 70°C dan $0,165$.

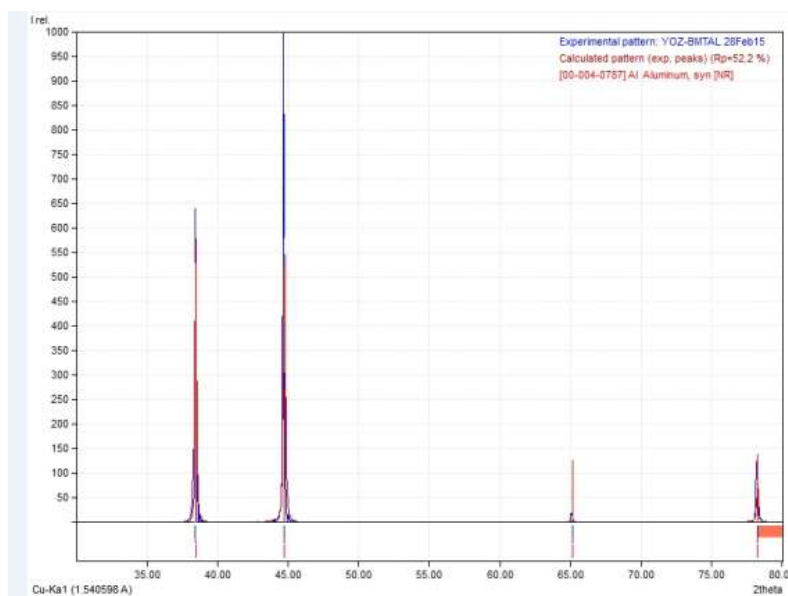
4.2 Hasil Pengujian Pergeseran Bimetal Terhadap Perubahan Temperatur

Karakteristik bimetal yang digunakan dalam penelitian ini adalah bimetal dengan bahan aluminium dengan tembaga. Panjang bimetal adalah 8 cm dengan lebar 3 cm dan tebal 1 mm .

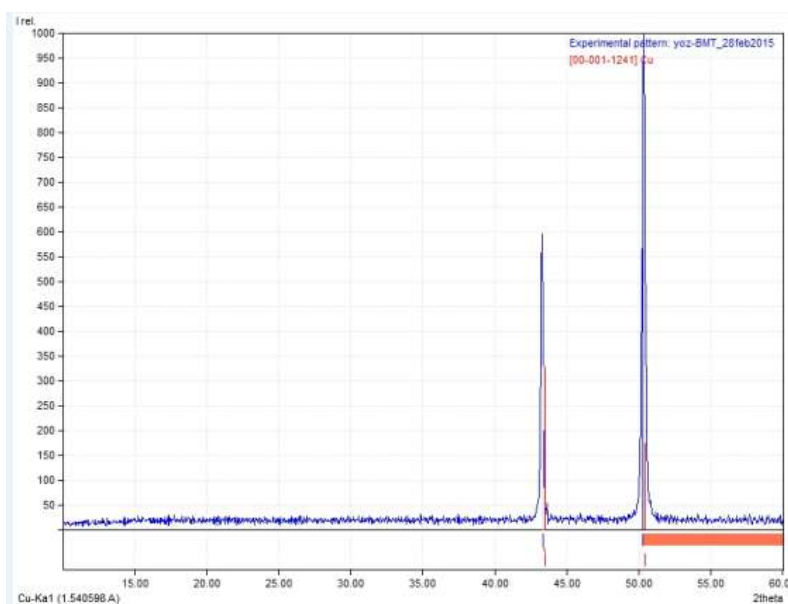


Gambar 4.3 Bimetal plat

Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa bahan dari bimetal adalah dominan bahan aluminium dengan tembaga. Hal ini ditunjukkan dengan hanya puncak-puncak bahan Aluminium dan tembaga yang terbaca pada *software Match*. Sebenarnya masih ada bahan penyusun dari bimetal hanya saja tidak terbaca pada waktu XRD oleh karena pada waktu preparasi sampel berupa plat/pellet sehingga bahan tersebut tidak muncul akibat dominannya bahan aluminium dan tembaga pada bimetal.



(a)



(b)

Gambar 4.4 Karakterisasi dengan XRD (a) pada aluminium, (b) pada tembaga

Setelah mengetahui karakteristik dari bimetal langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian batas pergeseran bimetal agar serat optik yang menempel pada bimetal tidak mengalami kerusakan (putus). Untuk mengujinya digunakan serat optik *singlemode* yang memiliki diameter dan bahan yang sama dengan FBG dilem di permukaan bimetal. Rangkaian percobaan terlihat pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Pengujian pergeseran bimetal terhadap perubahan temperatur.

Pada pengujian ini serat optik yang menempel pada bimetal akan mengalami regangan dan bimetal akan melengkung seiring dengan kenaikan temperatur. Selanjutnya akan dilihat hubungan antara pergeseran/simpangan bimetal (mm) terhadap perubahan temperatur ($^{\circ}\text{C}$). Hasil percobaan dapat dilihat pada Tabel 4.1; 4.2 dan Gambar 4.6; 4.7 berikut:

Tabel 4.1 Pengaruh temperatur terhadap pergeseran bimetal pada titik ukur di heater

No.	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Pergeseran bimetal (mm)
1.	110	0,5
2.	140	0,75
3.	170	1
4.	200	1,25
5.	220	1,5
6.	240	1,75

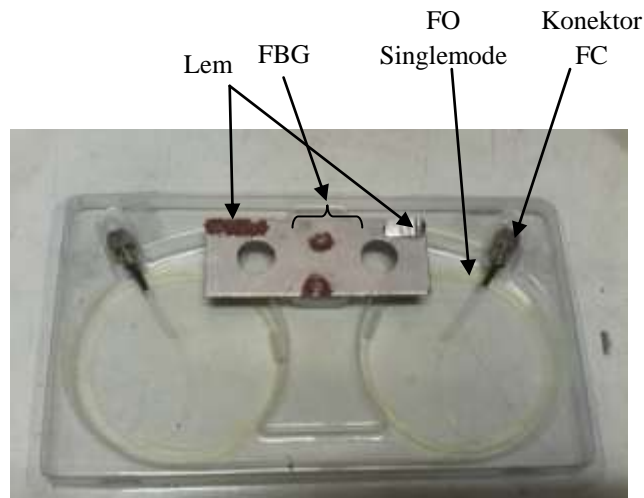
Tabel 4.2 Pengaruh temperatur terhadap pergeseran bimetal pada titik ukur di FBG

No.	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Pergeseran bimetal (mm)
1.	75,6	0,5
2.	92,2	0,75
3.	112,8	1
4.	131,7	1,25
5.	144,9	1,5
6.	156,6	1,75

Dari hasil pengujian diatas diketahui bahwa dengan temperatur 250°C pada heater atau $156,6^{\circ}\text{C}$ pada FBG menyebabkan pergeseran bimetal sebesar 1,75 mm dan serat optik FBG belum putus sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan kondisi temperatur $30\text{-}250^{\circ}\text{C}$, sensor masih dapat digunakan.

4.3 Pembuatan *Head Sensor*

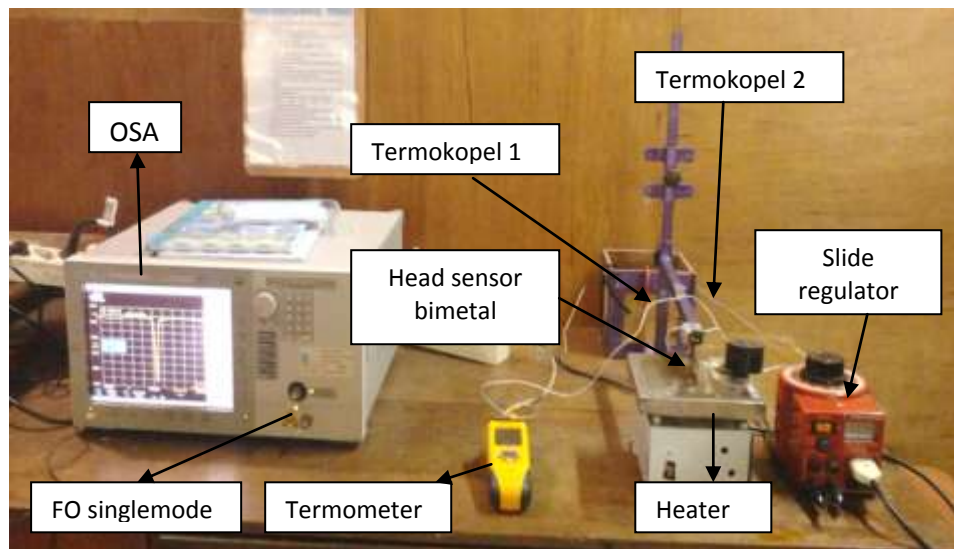
Desain *head* sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal adalah dengan meletakkan FBG di atas permukaan dari bimetal dan dilem/direkatkan pada bimetal seperti terlihat pada Gambar 4.6. FBG dilem dengan menggunakan lem *silicon red merk dextone* yang memiliki daya rekat yang kuat dan ketahanan terhadap temperatur sampai 343°C . Selain dilem FBG akan diikat menggunakan *port-port* yang sudah dilubangi di masing-masing ujung bimetal.



Gambar 4.6 *Head* sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal.

4.4 Karakterisasi Sensor

Karakterisasi sensor dilakukan untuk mengetahui kinerja dari sensor yang telah dirancang dan dibuat. Pada tahap ini akan dilakukan *set up* percobaan karakterisasi sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk melihat karakteristik dari sensor yang telah dirancang dan dibuat. Berbagai karakteristik dari sensor yang akan diamati adalah kalibrasi sensor, linieritas, sensitifitas, span (jangkauan pengukuran), akurasi sensor, *repeatability*, dan histeresis. *Set up* percobaan karakterisasi sensor dapat dilihat pada Gambar 4.7. Percobaan akan dilakukan beberapa kali (minimal 5 kali percobaan) di hari yang berbeda.



Gambar 4.7 *Set up* karakterisasi sensor

Realisasi *set up* rangkaian dari karakterisasi sensor dilakukan berdasarkan desain *set up* percobaan yang telah dikemukakan pada bab 3. Hanya saja pada realisasinya ditambahkan sebuah komponen berupa slide regulator. Pemakaian slide regulator ini dimaksudkan agar memudahkan mengontrol temperatur baik ketika temperatur naik maupun ketika temperatur turun kembali. Dengan mengatur tegangan keluaran dari regulator maka temperatur pada heater akan naik maupun turun dengan teratur dan dalam waktu yang relatif lebih lama dibandingkan jika heater langsung disambungkan pada tegangan 220 Volt.

4.4.1 *Kalibrasi sensor*

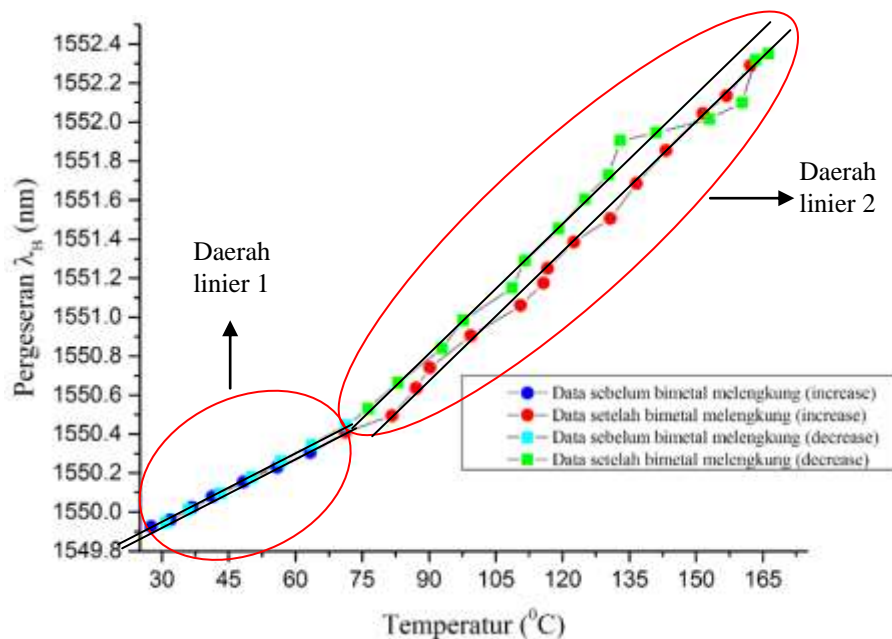
Proses kalibrasi sensor adalah dengan membandingkan luaran sensor berupa perubahan panjang gelombang dengan alat ukur temperatur yang telah terstandar. Alat ukur temperatur yang digunakan adalah termokopel tipe K. Pemilihan termokopel sebagai kalibrator oleh karena selain harganya yang murah, juga tersedia untuk rentang pengukuran -200°C sampai dengan 1200°C .

Luaran dari sensor adalah pergeseran panjang gelombang Bragg (nm) dan luaran dari termokopel adalah temperatur ($^{\circ}\text{C}$). Dari hubungan ini akan dibuat

grafik hubungan antara temperatur ($^{\circ}\text{C}$) dengan pergeseran panjang gelombang Bragg (nm).

4.4.2 Linieritas

Proses akuisisi data dilakukan pada daerah yang linier. Linieritas sensor diperoleh dari plot grafik kalibrasi hubungan antara temperatur ($^{\circ}\text{C}$) dengan pergeseran panjang gelombang Bragg (nm). Pada grafik yang terbentuk akan memberikan informasi tanggapan yang diberikan oleh sensor terhadap stimulus linier atau non linier. Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut:



Gambar 4.8 Linieritas sensor pada FBG saat temperatur naik dan saat temperatur turun

Dari kedua grafik diatas, terlihat ada dua daerah yang linier baik pada saat temperatur naik maupun pada saat temperatur turun. Masing-masing daerah liniernya adalah pada saat temperatur $27,6 - 71,2^{\circ}\text{C}$ dan $72-162,2^{\circ}\text{C}$. Munculnya dua daerah linier pada Grafik diatas dikarenakan oleh dua kondisi, yaitu kondisi pertama bimetal belum mengalami kelengkungan pada daerah linieritas $27,6-71,2^{\circ}\text{C}$. Dan kondisi kedua bimetal telah melengkung pada daerah linieritas $72-162,2^{\circ}\text{C}$.

4.4.3 Sensitifitas

Sensitifitas sensor dapat diketahui dari fungsi transfer dari sistem suatu sensor. fungsi transfer menyatakan fungsi yang menggambarkan hubungan antara luaran sensor terhadap stimulus yang diberikan. Fungsi transfer dapat diberikan dalam bentuk Tabel, grafik, maupun persamaan matematis. Pada penelitian ini luaran dari sensor berupa pergeseran panjang gelombang Bragg λ_B (nm) dengan stimulus berupa temperatur T ($^{\circ}\text{C}$) sehingga $\lambda_B = f(T)$. Dari persamaan matematis 2.22 pada bab 2 terlihat bahwa hubungan antara temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg adalah linier dan fungsi transfer dari hubungan tersebut dapat dituliskan:

$$\lambda_B = a T + \lambda_{B0}$$

dengan;

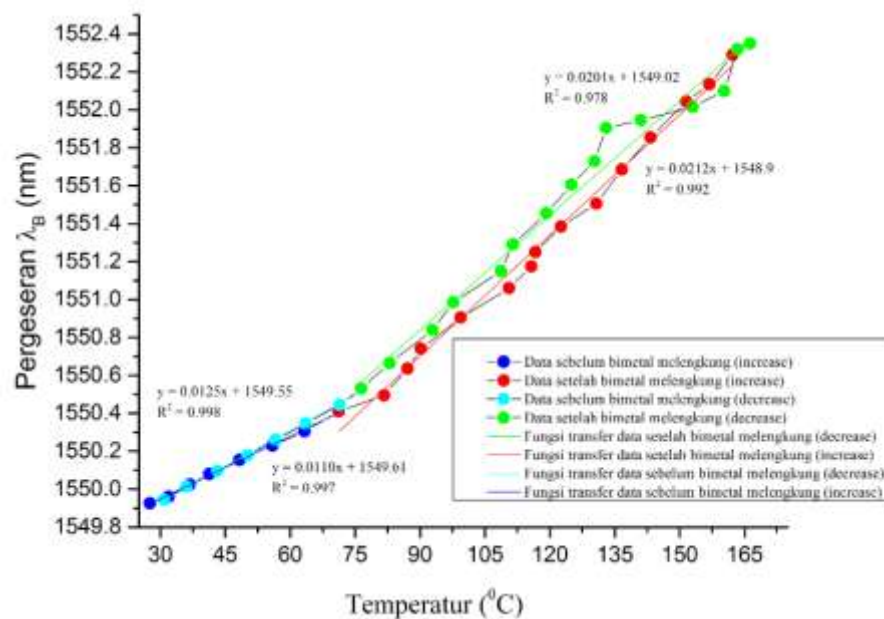
λ_B = pergeseran panjang gelombang Bragg (nm)

λ_{B0} = zero offset (nm)

a = sensitifitas

T = Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

Untuk sensitifitas dari sensor dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.9 Sensifitas sensor pada FBG saat kenaikan temperatur dan penurunan temperatur

Berdasarkan Gambar 4.9 diketahui bahwa sensitifitas dari sensor mengalami peningkatan ketika bimetal telah melengkung. Sensitifitas dari sensor sebelum melengkung adalah $0,0110 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. Sedangkan ketika bimetal mulai melengkung maka sensitifitasnya meningkat menjadi dua kali lipat sebesar $0,0212 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa sensitifitas sensor adalah $0,0212 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ atau $21,2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya untuk data fungsi transfer selengkapnya dari sensor dapat dilihat pada lampiran E Tabel E.1.

4.4.4 *Span*

Span merupakan perubahan dinamik dari stimulus yang masih mungkin dikonversi oleh sensor. Span juga menunjukkan kemungkinan input tertinggi yang dapat bekerja pada sensor tanpa menyebabkan ketidakakuratan. Dari Gambar 4.9 span pengukuran yang bisa dicapai oleh sensor adalah $T=(162,2-27,6)^{\circ}\text{C} = 134,6^{\circ}\text{C}$. Sebenarnya jangkauan pengukuran dari sensor masih dapat bertambah dilihat dari tren grafik yang dibentuk. Hanya saja kondisi pelat heater yang mengembang pada suhu diatas 250°C .

4.4.5 *Akurasi sensor*

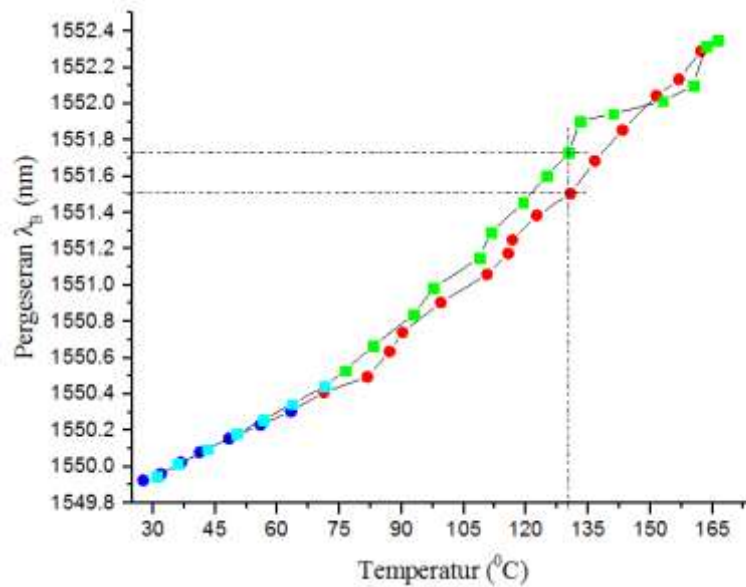
Akurasi adalah ketidakakuratan dari sensor, dihitung melalui deviasi tertinggi dari sensor ideal. Deviasi diukur dengan cara menghitung selisih antara pergeseran panjang gelombang Bragg pada kondisi ideal dan hasil eksperimen. Persamaan untuk menentukan akurasi dari sensor adalah:

$$\text{Akurasi sensor} = (T_{\text{ideal}} - T_{\text{eksp}}) / T_{\text{ideal}} \times 100\%$$

Berdasarkan perhitungan pada lampiran G Tabel G.1 didapatkan nilai akurasi sensor sebesar 0,0119. Hal ini berarti bahwa sensor memiliki nilai ketidakakuratan sebesar 1,19% sehingga keakuratan dari sensor temperatur berbasis FBG yang ditempelkan pada bimetal sebesar 98,81%.

4.4.6 Histeresis

Histeresis adalah selisih antara dua pembacaan keluaran (*output reading*) dalam suatu pengukuran berulang untuk suatu nilai masukan yang sama dan didekati dari arah yang berlawanan (*increase* dan *decrease*). Jadi dalam penelitian ini, histeresis diperoleh dari grafik hubungan antara temperatur terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg pada saat temperatur naik dan temperatur turun. Hasil eksperimen untuk histeresis dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut:



Gambar 4.10 Histeresis sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal

Dari Gambar 4.10 diatas didapatkan nilai histeresis dari pergeseran panjang gelombang Bragg pada saat temperatur naik maupun pada saat temperatur turun. Perhitungan nilai histeresis diperoleh dalam bentuk %FSO (*Full Scale Output*) dari selisih pada saat temperatur naik dengan pada saat temperatur turun. Nilai histeresis seperti pada Gambar 4.10 berada pada temperatur 130,7 °C dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\text{histeresis (\%FSO)} = \left[\frac{\text{TO-AOI}}{n} - \frac{\text{TO-AOD}}{n} \right] \times 100$$

$$\text{histeresis (\%FSO)} = \left[\frac{2,77084 - 1551,505}{15} - \frac{2,77084 - 1551,905}{15} \right] \times 100$$

$$\text{histeresis (\%FSO)} = 2,67$$

dengan

TO = *true output*

n = jumlah data

AOI = *actual output increase*

AOD = *actual output decrease*

Analisis perhitungan selengkapnya pada lampiran F Tabel F.1 didapatkan nilai histeresis sebesar 2,67 °C pada titik pengukuran 1551,505 nm.

4.4.7 *Repeatability*

Repeatability adalah selisih antara dua pembacaan keluaran (*output reading*) dalam suatu pengukuran berulang untuk suatu nilai masukan yang sama dan didekati dari arah yang sama (*increase* dan *decrease*) dengan cara kerja yang sama pula. *Repeatability* atau pengukuran berulang dilakukan untuk menguji kemampuan sensor dalam menunjukkan nilai luaran yang sama pada kondisi yang identik. Keakuratan dalam melakukan pengukuran berulang dinyatakan dalam kesalahan pengulangan (*repeatability error*) dan dirumuskan dengan:

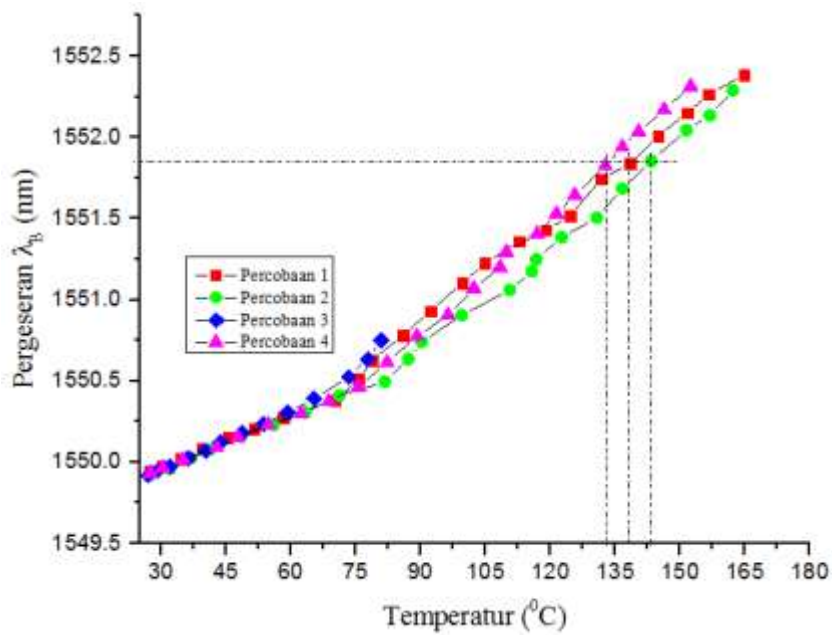
$$\delta = \frac{\Delta}{Fs} \times 100\%$$

dengan;

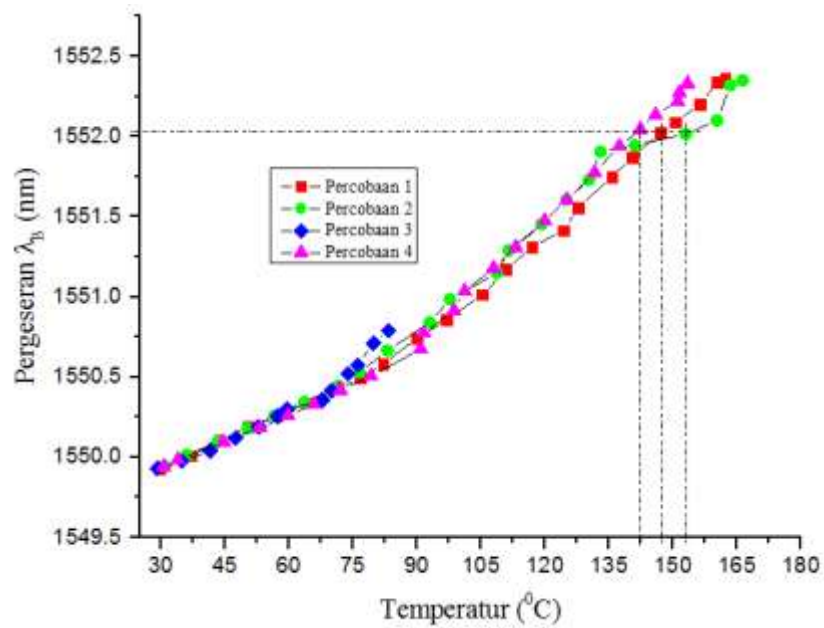
δ = repeatability error (%)

Fs = jangkauan pengukuran

Δ = daerah dengan stimulus berbeda memberikan luaran yang hampir sama



Gambar 4.11 *Repeatability* pada saat temperatur naik



Gambar 4.12 *Repeatability* pada saat temperatur turun

Berdasarkan hasil perhitungan pada lampiran H diperoleh besar *error repeatability* sebesar 2,95% untuk 4 kali pengukuran.

4.5 Analisis dan Keunggulan Sensor Temperatur Berbasis FBG Tipe Bimetal

Pemanfaatan serat optik sebagai sensor memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan sensor konvensional yang telah ada sebelumnya. Sebagai contoh sensor berbasis elektrik seperti RTD misal RTD tipe PT100 yang banyak digunakan di industri maupun thermistor mudah terpengaruh oleh guncangan atau getaran, selain itu karena berbasis elektrik maka akan mudah terpengaruh oleh interferensi gelombang elektromagnetik. Sedangkan pada sensor berbasis fiber optik selain diameter yang kecil, ringan, juga tahan terhadap guncangan, tahan terhadap interferensi gelombang elektromagnetik.

Secara umum luaran sensor berbasis serat optik dapat dibagi atas dua jenis yaitu dengan memanfaatkan rugi daya (dB) dan pergeseran panjang gelombang Bragg (nm). Pada penelitian ini dirancang sensor temperatur berbasis FBG memanfaatkan karakter terjadinya pergeseran panjang gelombang Bragg ($\Delta\lambda_B$) akibat perubahan temperatur (ΔT). Jadi sebagai keluaran sensor ini adalah pergeseran panjang gelombang Bragg ($\Delta\lambda_B$).

Sensor serat optik jenis FBG memiliki keunggulan dibandingkan dengan serat optik biasa/plastik. Serat optik FBG kebal terhadap fluktuasi intensitas cahaya/rugi daya karena sinyal sensor adalah dalam bentuk pergeseran puncak panjang gelombang Bragg. Jadi meskipun jika ada bagian serat optik yang bergeser atau melengkung tidak terlalu mempengaruhi pergeseran panjang gelombang Bragg yang terjadi. Tabel 4.3 memperlihatkan hasil pengukuran pergeseran serat optik FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg maupun rugi daya serat optik. Berdasarkan Tabel 4.3 tersebut terlihat bahwa pergeseran panjang gelombang Bragg cenderung tetap.

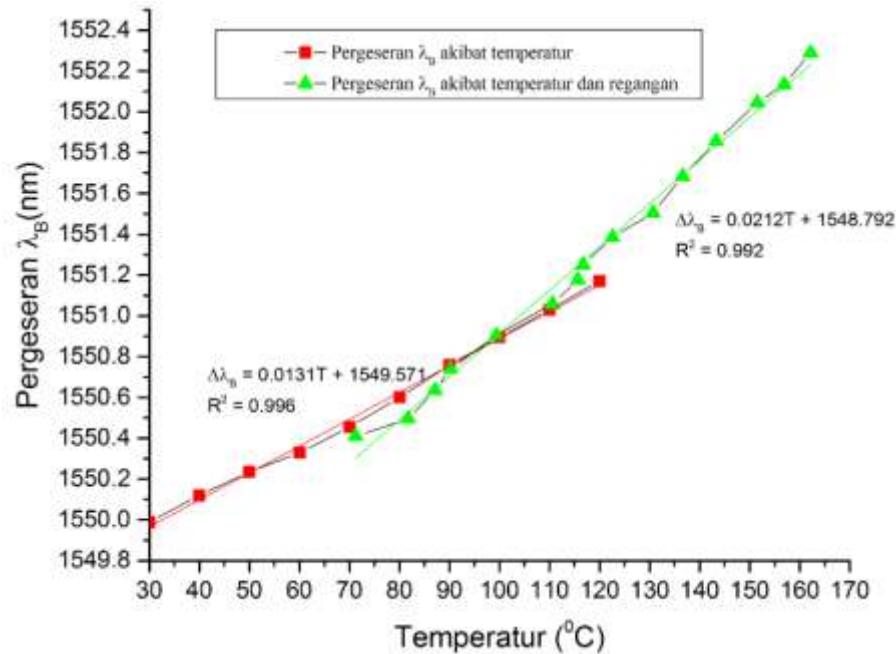
Tabel 4.3 Pengaruh kelengkungan FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya.

No	Pergeseran FBG (mm)	Pergeseran $\Delta\lambda_B$ (nm)	Rugi Daya (dB)
1	0	1549,970	-65,364
2	1	1549,975	-65,470
3	2	1549,975	-65,327
5	3	1549,975	-65,234
6	4	1549,970	-65,093
7	5	1549,970	-65,101
8	6	1549,970	-65,032
9	7	1549,970	-65,013
10	8	1549,970	-65,058
11	9	1549,970	-65,072

Selama ini telah banyak dirancang dan dibuat sensor temperatur berbasis serat optik. Namun masih memiliki keterbatasan seperti nilai sensitifitas sensor yang dihasilkan masih kecil sehingga beberapa penelitian dilakukan untuk meningkatkan sensitifitas dari sensor. Pada penelitian ini peningkatan sensitifitas dari sensor dilakukan dengan cara menempelkan FBG pada plat bimetal. Perbandingan hasil pergeseran panjang gelombang Bragg yang didapatkan akibat 1) pengaruh temperatur dengan 2) pengaruh temperatur dan regangan dapat dilihat pada Gambar 4.13. Pergeseran panjang gelombang Bragg akibat temperatur diukur pada temperatur 30 °C-120 °C tiap kenaikan 10 °C. Sementara pergeseran panjang gelombang Bragg akibat temperatur dan regangan diukur pada temperatur 71,2 °C-162,2 °C pada saat bimetal melengkung.

Berdasarkan Gambar 4.13 diperoleh grafik linieritas dengan fungsi transfer masing-masing adalah $\Delta\lambda_B = 0,0131T + 1549,571$ dan $\Delta\lambda_B = 0,0212T + 1548,92$. Nilai sensitifitas sensor dari fungsi transfer yang dibentuk adalah 0,0131 nm/°C pada saat FBG hanya dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Kemudian sensitifitasnya meningkat menjadi 0,0212 nm/°C pada saat

FBG dipengaruhi oleh perubahan temperatur dan perubahan regangan sebagai fungsi temperatur.



Gambar 4.13 Perbandingan antara pergeseran $\Delta\lambda_B$ akibat temperatur dengan pergeseran $\Delta\lambda_B$ akibat temperatur dan regangan.

Berdasarkan fungsi transfer pada gambar 4.3 tersebut didapatkan bahwa faktor yang dominan memberikan pengaruh terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg adalah perubahan temperatur. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pergeseran panjang gelombang Bragg akibat temperatur sebesar 0,013 nm. Sementara pergeseran panjang gelombang Bragg akibat regangan sebagai fungsi dari temperatur sebesar 0,008 nm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensitifitas sensor meningkat jika FBG ditempel pada bimetal dibandingkan jika hanya serat optik FBG sebagai *head* sensor. Nilai sensitifitas hampir dua kali lipat dari 13,1 pm/°C menjadi 21,2 pm/°C. Berdasarkan hasil karakterisasi sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal diperoleh keunggulan dari unjuk kerja sensor yang dihasilkan seperti sensitifitas dari sensor yang tinggi jika dibandingkan dengan sensor temperatur pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Jika dibandingkan dengan penelitian Mohd Afiq Ismail, dkk, 2011 hanya memperoleh nilai sensitifitas sensor sebesar 14 pm/°C. Oleh Reddy, Parne Saidi,

2010 dan Jongseob Song, dkk, 2003 memperoleh nilai sensitifitas sensor masing-masing 11,44 pm/⁰C dan 8,1 pm/⁰C. Nilai sensitifitas yang diperoleh pada penelitian ini hampir sama dengan nilai sensitifitas sensor yang dilakukan oleh Wei Wu, dkk, 2010 yang memperoleh nilai sensitifitas 21,3 pm/⁰C.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data dan pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Sensitifitas sensor Fiber Bragg Grating (FBG) terhadap perubahan temperatur diperoleh $0,013 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ atau $13 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa serat optik FBG yang hanya dipanaskan akan mengalami pergeseran panjang gelombang Bragg $\Delta\lambda_B$ sebesar $0,013 \text{ nm}$ tiap 1°C .
2. Sensitifitas sensor temperatur berbasis FBG yang ditempelkan pada bimetal (Al-Cu) mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan sensor temperatur berbasis FBG murni. Hal ini dikarenakan ada efek tambahan berupa regangan yang timbul pada FBG. Sensitifitas sensor yang diperoleh sebesar $0,0212 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ atau $21,2 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$.
3. Karakteristik sensor temperatur berbasis FBG yang ditempelkan pada bimetal (Al-Cu) meliputi sensitifitas, histeresis, jangkauan pengukuran, akurasi dan *repeatability*. Sensitifitas sensor diperoleh dari fungsi transfer $\lambda_B = 0,0212T + 1548,9$. Jangkauan pengukuran dari sensor adalah $134,6^{\circ}\text{C}$ dengan akurasi 0.0119 .

5.2 Saran

Disarankan dalam penelitian selanjutnya dalam proses akuisisi data sudah menggunakan *software* untuk mengurangi kesalahan pengukuran. Selain itu, perlu dilakukan analisis transfer panas pada bimetal.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin A, Melania MS, AM Hatta, A Rubiyanto. (2014). *Bend of Plastic Optical Fiber With Structural imperfections for Displacement Sensor*. Indian Journal of Pure and Applied Physics. Vol. 52, August 2014, pp. 520-524
- Hill, Kenneth O. (2002). *Fiber Optic Handbook-Fiber, Devices and systems for Optical Communications*. Communications Research Centre Nu-Wave Photonics Ottawa, Ontario, Canada. Hal 234.
- Hui, Rongqing dan Maurice O'Sullivan. (2009). *Fiber Optic Measurement Techniques*. Penerbit: Elsavier Academic Press.
- Ismail, Mohd Afiq, dkk. (2011). *A Fiber Bragg Grating-Bimetal Temperature Sensor for Solar Panel Inverters*. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia. *Sensors* 2011, 11, 8665-8673; doi:10.3390/s110908665.
- Kashyap, Raman. (2009). *Fiber Bragg Gratings*. Penerbit: Elsavier Academic Press.
- Rambe, Ahmad Mulia.(2003). *Penggunaan Serat Optik Plastik sebagai Media Transmisi untuk Alat Ukur Temperatur Jarak Jauh*. Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Reddy, Parne Saidi,dkk. (2010). *A Novel for High Temperature Measurements Using Fiber Bragg Grating Sensor*. Department of Physics, National Institute of Technology, Warangal 506004, A.P., India. *Optica Applicata*, Vol. XL, No. 3, 2010
- Reddy, Parne Saidi,dkk. (2012). *Method for Enhancing and Controlling Temperature Sensitivity of Fiber Bragg Grating Sensor Based on Two Bimetallic Strips*. Department of Physics, National Institute of Technology, Warangal 506004, A.P., India. *IEEE photonics journal*, Vol. 4, No. 3, 2012.
- Samian. (2010). *Aplikasi Multimode Fiber Coupler sebagai Sensor Temperatur*. Jurnal Fisika dan Aplikasinya. Volume 6 Nomor 1 Januari 2010.
- Setiono, Andi dan Bambang Widiyatmoko. (2010). *Karakterisasi Fiber Bragg Grating Terhadap Suhu Menggunakan Teknik Sapuan Panjang Gelombang Laser*. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY, Semarang 10 April 2010 hal. 241-246.
- Sinuhaji, Depi Santi.(2010). *Karakterisasi Fiber Bragg Grating (FBG) Untuk Pengembangan Sistem Sensor Strain Tanah* <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/17724/4/Chapter%20II.pdf>. Diakses pada 11 Oktober 2014.

Song, Jongseob, Won-Taek Han, Un-Chul Paek, dan Youngjoo chung. (2003). *New Compensation Method for Temperature Sensitivity of Fiber Bragg Grating Using Bi-metal*. Department of information and communications Kwangju institute of science and technology. Gwangju Korea.

Subianto, Fristya Astri Fortunata. (2015). *Karakterisasi Sensor Temperatur Berbasis Perubahan Puncak Gelombang Dari Fiber Bragg Grating (FBG)*. Fakultas MIPA ITS.

Sulaeman, dkk. *Kalibrasi Sensor Temperatur dengan Metode Perbandingan dan Simulasi*. <http://download.portalgaruda.org/article.php?article=49460&val=4031&title=>. Diakses pada tanggal 20 Nopember 2014.

Tyagarajan, K dan Ajoy Ghatak. (2007). *Fiber Optic Essentials*. Penerbit: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Wu Wei, Zheng Qin, Xin Liu dan Ting chen. (2010). *Investigation on low-temperature characteristics of FBG sensors and the technology to enhance sensitivity*. Department of Physical , School of Science, Wuhan university of Technology.

LAMPIRAN A

Tabel A.1 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi FBG terhadap temperatur (Pengukuran pertama)

T_0	: 29.8 °C		Rugi awal	: -53.181 dB	Sc/div	: 1 dB		
$\Delta\lambda_{90}$: 1549.945 nm		Span	: 5 nm				
No.	T increase (°C)	$\Delta\lambda_0$ increase (nm)	t increase (s)	Rugi increase (dB)	T decrease (°C)	$\Delta\lambda_0$ decrease (nm)	t decrease (s)	Rugi decrease (dB)
1	30	1549.96	30	-53.36	31.9	1549.98	3559	-52.805
2	40	1550.065	186	-52.727	40	1550.065	1996	-52.893
3	50	1550.195	284	-52.708	50	1550.175	1312	-52.457
4	60	1550.295	396	-52.579	60	1550.275	898	-52.216
5	70	1550.415	551	-52.445	70	1550.395	615	-52.123
6	80	1550.555	756	-52.254	80	1550.53	431	-52.11
7	90	1550.74	1066	-51.955	90	1550.715	270	-52.049
8	100	1550.885	1291	-51.708	100	1550.855	170	-51.946
9	110	1551.05	1458	-51.664	110	1550.995	77	-51.915
10	120	1551.2	1560	-51.778	120	1551.12	35	-51.651

Tabel A.2 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi FBG terhadap temperatur (Pengukuran kedua)

T_0	: 29 °C		Rugi awal	: -66.76 dB	Sc/div	: 1 dB		
$\Delta\lambda_{90}$: 1549.995 nm		Span	: 5 nm				
No.	T increase (°C)	$\Delta\lambda_0$ increase (nm)	t increase (s)	Rugi increase (dB)	T decrease (°C)	$\Delta\lambda_0$ decrease (nm)	t decrease (s)	Rugi decrease (dB)
1	30	1550	68	-66.17	31	1549.99	4184	-65.353
2	40	1550.135	161	-66.095	40	1550.08	2134	-65.969
3	50	1550.24	224	-65.772	50	1550.205	1340	-65.07
4	60	1550.35	291	-65.779	60	1550.33	911	-65.801
5	70	1550.47	366	-65.881	70	1550.455	623	-66.067
6	80	1550.61	452	-65.66	80	1550.595	438	-66.066
7	90	1550.8	561	-65.771	90	1550.77	293	-66.134
8	100	1550.955	704	-65.66	100	1550.905	174	-65.756
9	110	1551.075	865	-65.772	110	1551.03	98	-65.977
10	120	1551.22	1120	-65.036	120	1551.185	43	-65.878

Tabel A.3 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi FBG terhadap temperatur (Pengukuran ketiga)

T_0	: 29 °C		Rugi awal	: -66.76 dB	Sc/div	: 1 dB		
$\Delta\lambda_{90}$: 1549.945 nm		Span	: 5 nm				
No.	T increase (°C)	$\Delta\lambda_0$ increase (nm)	t increase (s)	Rugi increase (dB)	T decrease (°C)	$\Delta\lambda_0$ decrease (nm)	t decrease (s)	Rugi decrease (dB)
1	30	1549.985	58	-65.299	31.3	1549.995	4201	-65.282
2	40	1550.13	135	-65.309	40	1550.09	2162	-65.339
3	50	1550.25	204	-65.119	50	1550.205	1345	-65.306
4	60	1550.35	268	-65.068	60	1550.325	914	-65.316
5	70	1550.495	338	-65.134	70	1550.445	638	-65.275
6	80	1550.64	425	-65.009	80	1550.6	439	-65.159
7	90	1550.8	534	-65.984	90	1550.77	286	-65.1
8	100	1550.94	698	-64.914	100	1550.9	194	-64.817
9	110	1551.085	906	-64.02	110	1551.04	96	-64.925
10	120	1551.23	1169	-64.96	120	1551.2	43	-64.878

Tabel A.4 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi FBG terhadap temperatur (Pengukuran keempat)

T_0	: 28.5 °C			Rugi awal	: -64.76 dB	Sc/div	: 1 dB		
$\Delta\lambda_{80}$: 1549.970 nm			Span	: 5 nm				
No.	T increase (°C)	$\Delta\lambda_0$ increase (nm)	t increase (s)	Rugi increase (dB)	T decrease (°C)	$\Delta\lambda_0$ decrease (nm)	t decrease (s)	Rugi decrease (dB)	
1	30	1549.99	48	-64.906	30	1549.965	3938	-64.903	
2	40	1550.12	78	-64.725	40	1550.06	1947	-65.047	
3	50	1550.235	136	-64.953	50	1550.19	1262	-64.464	
4	60	1550.33	196	-64.981	60	1550.285	898	-64.712	
5	70	1550.455	258	-65.237	70	1550.405	617	-65.147	
6	80	1550.6	332	-65.242	80	1550.54	430	-65.51	
7	90	1550.76	421	-65.178	90	1550.705	291	-65.672	
8	100	1550.895	537	-64.913	100	1550.845	181	-65.642	
9	110	1551.03	688	-64.998	110	1550.995	83	-65.468	
10	120	1551.17	908	-65.023	120	1551.12	39	-65.414	

Tabel A.4 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi FBG terhadap temperatur (Pengukuran kelima)

T_0	: 28.7 °C			Rugi awal	: -64.76 dB	Sc/div	: 1 dB		
$\Delta\lambda_{80}$: 1549.965 nm			Span	: 5 nm				
No.	T increase (°C)	$\Delta\lambda_0$ increase (nm)	t increase (s)	Rugi increase (dB)	T decrease (°C)	$\Delta\lambda_0$ decrease (nm)	t decrease (s)	Rugi decrease (dB)	
1	30	1549.98	48	-65.128	30	1549.96	3956	-64.902	
2	40	1550.115	80	-65.074	37	1550.035	2313	-64.89	
3	50	1550.23	138	-65.943	50	1550.19	1261	-64.774	
4	60	1550.375	214	-65.964	60	1550.28	881	-64.873	
5	70	1550.455	265	-64.993	70	1550.405	620	-64.893	
6	80	1550.615	344	-64.907	80	1550.54	435	-64.917	
7	90	1550.78	438	-64.922	90	1550.725	294	-64.88	
8	100	1550.895	551	-64.686	100	1550.87	184	-64.839	
9	110	1551.04	726	-64.674	110	1551	94	-64.722	
10	120	1551.16	928	-64.757	120	1551.155	33	-64.79	

LAMPIRAN B

Tabel B1. Perhitungan Error dari karakteristik FBG terhadap temperatur

	X		Y							Error		
	T_a increase (°C)	$\Delta\lambda_B$ increase (nm)	$X_i - X_{ave}$	$(X_i - X_{ave})^2$	XY	$\hat{Y} = aX+b$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	Standar Deviasi	Standar Error Estimasi (Se)	Error Intecept	Error Slope
1	30	1549.985	45	2025	46499.55	1549.94	0.045	0.002025	28.72281323	0.165437	0.001288	0.270079
2	40	1550.13	35	1225	62005.2	1550.05	0.08	0.0064				
3	50	1550.25	25	625	77512.5	1550.16	0.09	0.0081				
4	60	1550.35	15	225	93021	1550.27	0.08	0.0064				
5	70	1550.495	5	25	108534.7	1550.38	0.115	0.013225				
6	80	1550.64	5	25	124051.2	1550.49	0.15	0.0225				
7	90	1550.8	15	225	139572	1550.6	0.2	0.04				
8	100	1550.94	25	625	155094	1550.71	0.23	0.0529				
9	110	1551.085	35	1225	170619.4	1551.232	-0.147	0.021609				
10	120	1551.23	45	2025	186147.6	1551.444	-0.214	0.045796				
$X_{ave} \rightarrow$	75			8250			$\Sigma(Y - \hat{Y})^2$	0.218955				
$(X_{ave})^2 \rightarrow$	5625		$\Sigma(X_i - X_{ave})^2 \rightarrow$	16500								
			Akar $\Sigma(X_i - X_{ave})^2 \rightarrow$		128.4523258				1/n	0.1		

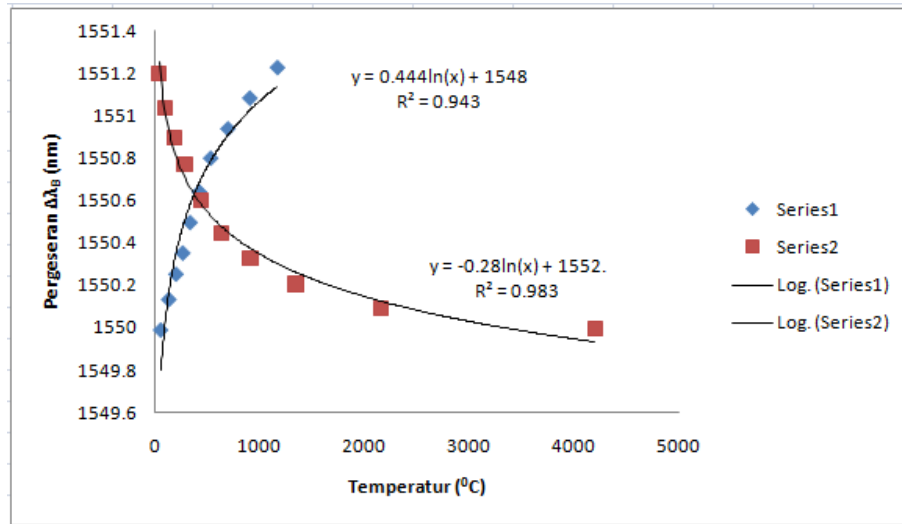
Tabel B2. Perhitungan Akurasi dari karakteristik FBG terhadap temperatur

Level	TRUE	Actual	error	%FSO	%Reading
30	1549.94	1549.985	0.045	0.214286	0.002903
40	1550.07	1550.13	0.06	0.285714	0.003871
50	1550.2	1550.25	0.05	0.238095	0.003225
60	1550.33	1550.35	0.02	0.095238	0.00129
70	1550.46	1550.495	0.035	0.166667	0.002257
80	1550.59	1550.64	0.05	0.238095	0.003225
90	1550.72	1550.8	0.08	0.380952	0.005159
100	1550.85	1550.94	0.09	0.428571	0.005803
110	1550.98	1551.085	0.105	0.5	0.00677
120	1551.11	1551.23	0.12	0.571429	0.007736

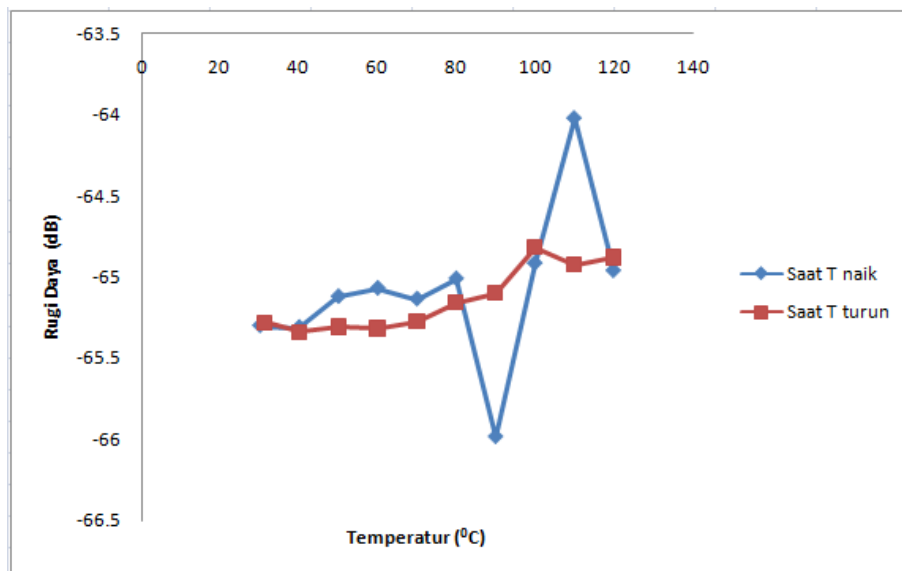
Tabel B3. Perhitungan histeresis dari karakteristik FBG terhadap temperatur

Level	True Out	increase	decrease	%FSO		
				increase	decrease	histeresis
30	0.414	1549.985	1549.995	-15495.7	-15495.8	0.1
40	0.552	1550.13	1550.09	-15495.8	-15495.4	0.4
50	0.69	1550.25	1550.205	-15495.6	-15495.2	0.45
60	0.828	1550.35	1550.325	-15495.2	-15495	0.25
70	0.966	1550.495	1550.445	-15495.3	-15494.8	0.5
80	1.104	1550.64	1550.6	-15495.4	-15495	0.4
90	1.242	1550.8	1550.77	-15495.6	-15495.3	0.3
100	1.38	1550.94	1550.9	-15495.6	-15495.2	0.4
110	1.518	1551.085	1551.04	-15495.7	-15495.2	0.45
120	1.656	1551.23	1551.2	-15495.7	-15495.4	0.3

LAMPIRAN C



Gambar C.1 Waktu tanggap dari FBG terhadap temperatur



Gambar C.2 Grafik hubungan antara perubahan temperatur dengan rugi daya pada FBG

LAMPIRAN D

Tabel D.1 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Senin, 20 April 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27,4	30,1	1549,94	30,6	35,4	1549,94
2	30,3	40,1	1549,97	33,9	40,1	1549,99
3	35	50,2	1550,02	44,6	50	1550,1
4	42,8	60,2	1550,09	53,1	60	1550,19
5	47,6	70,1	1550,16	59,7	70	1550,26
6	54,7	80	1550,23	65,8	80	1550,33
7	62,3	90	1550,3	72	90,1	1550,42
8	68,7	100	1550,38	79,2	100,1	1550,51
9	75,6	110	1550,47	90,8	110	1550,68
10	82,2	120	1550,62	91,5	120	1550,78
11	89,1	130	1550,78	98,6	130	1550,92
12	96,3	140	1550,91	101,1	139,9	1551,04
13	102,3	150	1551,07	107,9	150	1551,18
14	108,3	160	1551,2	113,1	160	1551,31
15	109,8	170	1551,3	119,9	170,1	1551,48
16	116,9	180	1551,41	125,1	180,1	1551,61
17	121,4	190	1551,53	131,6	190,1	1551,78
18	125,6	200,1	1551,65	137,4	200,2	1551,94
19	132,7	210,1	1551,83	142,3	210,1	1552,05
20	136,6	220	1551,94	145,9	220,6	1552,14
21	140,4	230	1552,04	151,1	230	1552,22
22	146,3	240	1552,17	151,5	239,8	1552,28
23	152,4	250,1	1552,32	153,4	250	1552,33

$$T_0 \text{ FBG} = 26,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 26,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,925 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = -45,85 \text{ dBm}$$

Tabel D.2 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Senin, 30 Maret 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27,2	30,1	1549,95	29,7	30,7	1549,93
2	30,3	40	1549,98	37	40	1550,01
3	34,5	50,1	1550,02	43,6	50	1550,11
4	39,3	60	1550,08	50,3	60	1550,19
5	45,5	70,1	1550,15	57,1	70	1550,26
6	51,4	80,1	1550,21	64,2	80	1550,34
7	58,3	90	1550,28	71,4	89,7	1550,43
8	70	100	1550,38	76,7	99,9	1550,50
9	75,6	110,1	1550,51	82	110	1550,58
10	78,7	120	1550,63	90	120	1550,75
11	85,8	130	1550,78	96,9	129,9	1550,86
12	92,2	140	1550,93	105,3	140	1551,02
13	99,6	150,1	1551,11	110,8	150	1551,17
14	104,8	160	1551,23	116,9	160	1551,31
15	112,8	170,1	1551,36	124,2	170	1551,42
16	118,9	180	1551,43	127,8	180	1551,56
17	124,5	190,5	1551,52	135,6	190	1551,75
18	131,7	200	1551,75	140,4	200	1551,87
19	138,5	210	1551,84	147	210	1552,03
20	144,9	220,1	1552,01	150,3	220	1552,09
21	151,6	230	1552,15	156,3	230	1552,20
22	156,6	240,1	1552,27	160,4	240	1552,34
23	164,8	250	1552,39	162,2	245	1552,36

$$T_0 \text{ FBG} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,935 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = - 58,04 \text{ dBm}$$

Tabel D.3 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Selasa, 31 Maret 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27,6	30	1549,925	30,8	31,8	1549,945
2	31,9	40	1549,96	36	40	1550,015
3	36,8	50	1550,025	43,2	50	1550,095
4	41,3	60,1	1550,08	50,2	60	1550,18
5	48,3	70	1550,155	56,6	70	1550,26
6	55,9	80,1	1550,23	63,6	80	1550,345
7	63,3	90	1550,305	71,4	90	1550,445
8	71,2	100,2	1550,41	76,4	100	1550,53
9	81,7	112	1550,495	83	110	1550,665
10	87,1	120,2	1550,635	92,9	120	1550,84
11	90,2	130	1550,74	97,7	130	1550,985
12	99,4	140,1	1550,905	108,7	139	1551,15
13	110,6	150,2	1551,06	111,5	150	1551,29
14	115,7	160	1551,175	119,2	160	1551,455
15	116,7	171,3	1551,25	125	170	1551,605
16	122,6	180,1	1551,385	130,3	180	1551,73
17	130,7	190,1	1551,505	133	190	1551,905
18	136,6	200,1	1551,685	141	200	1551,945
19	143,3	210,1	1551,855	153	210	1552,015
20	151,5	220	1552,045	160,3	220	1552,10
21	156,9	230	1552,135	163,4	230	1552,32
22	162,2	240,2	1552,29	166,3	240	1552,35

$$T_0 \text{ FBG} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,920 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = - 58,04 \text{ dBm}$$

Tabel D.4 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Selasa, 07 April 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27	30,1	1549,92	29,1	31,7	1549,93
2	29	40	1549,945	34,8	40	1549,975
3	32	50	1549,975	41,5	50	1550,04
4	36,3	60	1550,025	47,4	60	1550,12
5	40,2	70	1550,07	52,8	70	1550,19
6	43,6	80	1550,12	57,3	80	1550,255
7	48,7	90	1550,18	59,6	90	1550,3
8	53,6	100	1550,235	67,7	100	1550,355
9	59,2	110	1550,305	69,9	110	1550,415
10	65,3	120	1550,39	73,8	120	1550,52
11	73,3	131,7	1550,525	76,1	130	1550,575
12	77,7	140,1	1550,635	79,7	140	1550,71
13	80,8	150	1550,75	83,3	150	1550,79

$$T_0 \text{ FBG} = 26,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 26,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,905 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = - 57,68 \text{ dBm}$$

Tabel D.5 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Jumat, 13 Maret 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27,8	26,8	1549,94	29	29,7	1549,95
2	27,9	32	1549,94	30,5	32	1549,965
3	29,8	37,1	1549,975	32,9	37	1549,985
4	32,1	42,1	1549,995	37,4	42	1550,045
5	34,8	47,1	1550,025	40,9	47	1550,09
6	37,6	52	1550,045	44,9	52	1550,125
7	39,9	57	1550,075	48,3	57	1550,165
8	43,1	62,1	1550,115	52	62	1550,2
9	46,4	67	1550,15	55	67	1550,24
10	50	72,1	1550,175	58,3	72	1550,27
11	53	77	1550,215	61,7	77	1550,305
12	56,5	82	1550,245	65,7	82	1550,355
13	60	87	1550,28	68,7	87	1550,385
14	63,6	92,1	1550,325	72,7	92	1550,44
15	66,7	97	1550,345	75,5	97	1550,48
16	69,2	102	1550,4	79,7	102,1	1550,55
17	72,3	107	1550,44	83,3	107	1550,64
18	75,3	112	1550,47	87,6	112,1	1550,72
19	79	117	1550,563	90,9	117	1550,795
20	82,1	122	1550,635	94,7	121,9	1550,875
21	90,3	132	1550,81	100	132	1550,975
22	96,3	142	1550,94	105,1	142	1551,1
23	105,4	152	1551,11	105,3	152	1551,21

$$T_0 \text{ FBG} = 26,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 26,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,940 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = - 58,36 \text{ dBm}$$

Tabel D.6 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Minggu siang, 15 Maret 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27,1	27,1	1549,945	29,3	29,5	1549,955
2	28,5	32,1	1549,97	31,5	32,1	1549,975
3	31,3	37	1549,995	35,8	37	1550,02
4	34	42	1550,02	40,1	42	1550,075
5	38	48,3	1550,07	44,2	47	1550,125
6	39,4	52	1550,095	50	52	1550,175
7	44	57	1550,145	54,3	57	1550,23
8	49,1	62,1	1550,19	58,7	62	1550,26
9	52,8	67,2	1550,235	64	67	1550,315
10	57,3	72	1550,275	67,9	72	1550,355
11	61,1	77	1550,31	69,5	77	1550,4
12	65,2	82	1550,355	73,5	82	1550,465
13	68,8	87	1550,435	78	87	1550,525
14	72,9	92	1550,485	82,2	92	1550,665
15	77,7	97	1550,605	87,5	97	1550,75
16	82	102	1550,705	89,8	102	1550,835
17	89	107	1550,87	94,5	107	1550,895
18	90,7	112	1550,92	97	112	1550,965
19	95,4	117,1	1551,015	101,1	117	1551,045
20	98,8	122,6	1551,055	102,8	122,2	1551,1

$$T_0 \text{ FBG} = 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,945 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = -35,10 \text{ dBm}$$

Tabel D.7 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Minggu sore, 15 Maret 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	27,5	27,5	1549,945	29,2	29,6	1549,955
2	28,4	32	1549,96	31,5	32	1549,97
3	31,3	37	1549,98	35,9	37	1550,01
4	32,8	42,1	1550,005	39,5	42	1550,055
5	35,3	47	1550,03	44,2	47	1550,105
6	38,2	52	1550,065	46,9	52	1550,145
7	41,7	57	1550,1	52,9	57	1550,2
8	44,9	62	1550,14	55,1	62	1550,23
9	47,4	67	1550,175	58,5	67	1550,27
10	52,6	72	1550,22	65,8	72	1550,305
11	55,7	77	1550,255	68,5	77	1550,37
12	59,3	82	1550,295	69,5	82	1550,39
13	61,8	87	1550,33	74,3	87	1550,49
14	66,4	92	1550,375	76,1	91,8	1550,52
15	70,9	97	1550,44	80,9	97	1550,605
16	72,8	102	1550,515	84,3	102	1550,725
17	78,6	107	1550,61	89,1	107	1550,78
18	82	112	1550,715	91	112	1550,87
19	86,5	117	1550,785	93,4	117	1550,91
20	90,3	122	1550,875	97,8	122	1550,99
21	93,2	127	1550,955	102,1	12,1	1551,07
22	97,8	132	1551,03	103,3	132	1551,13
23	104,8	137	1551,145	103,9	137	1551,145
24	109,9	140	1551,185	104,9	140	1551,185

$$T_0 \text{ FBG} = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_0 \text{ heater} = 27,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{B0} = 1549,945 \text{ nm}$$

$$\text{Span} = 5 \text{ nm}$$

$$\text{Sc/div} = 1 \text{ dB}$$

$$\text{Ref} = - 35,10 \text{ dBm}$$

Tabel D.8 Hasil Pengamatan untuk Karakterisasi Sensor (Jumat, 20 Maret 2015)

No.	Temperatur naik			Temperatur turun		
	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)	T pada FBG (°C)	T pada heater (°C)	Pergeseran λ_B (nm)
1	25,9	25,9	1549,905	29	29	1549,95
2	26,9	32,1	1549,92	30,7	32	1549,960
3	28,5	37,1	1549,94	34,6	37	1549,995
4	30,9	42,1	1549,955	38,6	42	1550,03
5	33,8	47	1549,99	42,2	47	1550,075
6	36,9	52	1550,03	46,1	52	1550,11
7	39,6	57	1550,07	49,7	57	1550,155
8	43,1	62	1550,105	52,9	62	1550,185
9	46,5	67	1550,135	55,7	67	1550,22
10	50,4	72	1550,19	58,6	72	1550,255
11	54,7	77,1	1550,23	62,4	77	1550,285
12	58,1	82	1550,285	66	82	1550,33
13	61,6	87	1550,325	68	87	1550,385
14	65,7	92	1550,39	71,8	92	1550,425
15	69,3	97,2	1550,43	75,6	97	1550,485
16	73	102	1550,485	78,3	102	1550,555
17	75,9	107	1550,585	80,5	107	1550,60
18	81	112,1	1550,68	84,5	112,1	1550,728
19	94,5	135	1550,885	94,3	135	1550,885

$T_0 \text{ FBG} = 25,9 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_0 \text{ heater} = 25,9 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\lambda_{B0} = 1549,905 \text{ nm}$

Span = 5 nm

Sc/div = 1 dB

Ref = - 58,05 dBm

LAMPIRAN E

Tabel E.1 Data fungsi transfer sensor

Titik pengamatan	Fungsi transfer saat T naik (nm)	Fungsi transfer Saat T turun (nm)	Koefisien Determinasi R^2	Sensitivity (pm/$^{\circ}$C)	Zero Offset
T di FBG sebelum bimetal melengkung	$\lambda_B = 0.0110T + 1549.61$	$\lambda_B = 0.0125T + 1549.55$	0.997	11,0	1549,55
T di FBG setelah bimetal melengkung	$\lambda_B = 0.0212T + 1548.90$	$\lambda_B = 0.0201T + 1549.02$	0.992	21,2	1549,02
T di heater sebelum bimetal melengkung	$\lambda_B = 0.0069T + 1549.68$	$\lambda_B = 0.0085T + 1549.66$	0.983	0,69	1549,68
T di heater setelah bimetal melengkung	$\lambda_B = 0.0136T + 1548.98$	$\lambda_B = 0.0132T + 1549.28$	0.995	1,36	1548,98

LAMPIRAN F

Tabel F.1 Histeresis sensor dalam bentuk % FSO (*full scale output*)

Level	True Out	increase	decrease	%FSO		
				increase	decrease	histeresis
71.2	1.50944	1550.41	1550.53	-10326	-10326.8	0.8
81.7	1.73204	1550.495	1550.665	-10325.1	-10326.2	1.133333
87.1	1.84652	1550.635	1550.84	-10325.3	-10326.6	1.366667
90.2	1.91224	1550.74	1550.985	-10325.5	-10327.2	1.633333
99.4	2.10728	1550.905	1551.15	-10325.3	-10327	1.633333
110.6	2.34472	1551.06	1551.29	-10324.8	-10326.3	1.533333
115.7	2.45284	1551.175	1551.455	-10324.8	-10326.7	1.866667
116.7	2.47404	1551.25	1551.605	-10325.2	-10327.5	2.366667
122.6	2.59912	1551.385	1551.73	-10325.2	-10327.5	2.3
130.7	2.77084	1551.505	1551.905	-10324.9	-10327.6	2.666667
136.6	2.89592	1551.685	1551.945	-10325.3	-10327	1.733333
143.3	3.03796	1551.855	1552.015	-10325.4	-10326.5	1.066667
151.5	3.2118	1552.045	1552.1	-10325.6	-10325.9	0.366667
156.9	3.32628	1552.135	1552.32	-10325.4	-10326.6	1.233333
162.2	3.43864	1552.29	1552.35	-10325.7	-10326.1	0.4

LAMPIRAN G

Tabel G.1 Akurasi sensor temperatur berbasis FBG tipe bimetal

Level	TRUE	Actual	error	%FSO	%Reading
27.6	1549.91	1549.925	-0.0114	-0.05429	-0.00074
31.9	1549.96	1549.96	0.0009	0.00429	5.8E-05
36.8	1550.01	1550.025	-0.0102	-0.04857	-0.00066
41.3	1550.06	1550.08	-0.0157	-0.07476	-0.00101
48.3	1550.14	1550.155	-0.0137	-0.06524	-0.00088
55.9	1550.22	1550.23	-0.0051	-0.02429	-0.00033
63.3	1550.31	1550.305	0.0013	0.00619	8.4E-05
71.2	1550.39	1550.41	-0.0168	-0.08	-0.00108
81.7	1550.63	1550.495	0.13704	0.65257	0.00884
87.1	1550.75	1550.635	0.11152	0.53105	0.00719
90.2	1550.81	1550.74	0.07224	0.344	0.00466
99.4	1551.01	1550.905	0.10228	0.48705	0.00659
110.6	1551.24	1551.06	0.18472	0.87962	0.01191
115.7	1551.35	1551.175	0.17784	0.84686	0.01146
116.7	1551.37	1551.25	0.12404	0.59067	0.008
122.6	1551.5	1551.385	0.11412	0.54343	0.00736
130.7	1551.67	1551.505	0.16584	0.78971	0.01069
136.6	1551.8	1551.685	0.11092	0.52819	0.00715
143.3	1551.94	1551.855	0.08296	0.39505	0.00535
151.5	1552.11	1552.045	0.0668	0.3181	0.0043
156.9	1552.23	1552.135	0.09128	0.43467	0.00588
162.2	1552.34	1552.29	0.04864	0.23162	0.00313

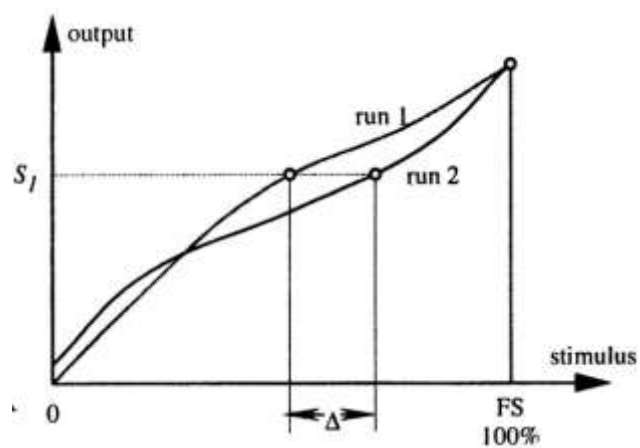
LAMPIRAN H

Tabel H.1 *Repeatability* sensor pada saat temperatur naik untuk 3 kali eksperimen

$T_1 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\lambda_{B1} (\text{nm})$	$T_2 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\lambda_{B2} (\text{nm})$	$T_3 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\lambda_{B3} (\text{nm})$
27.2	1549.945	27.6	1549.925	27.4	1549.935
30.3	1549.975	31.9	1549.96	30.3	1549.965
34.5	1550.02	36.8	1550.025	35	1550.015
39.3	1550.08	41.3	1550.08	42.8	1550.09
45.4	1550.15	48.3	1550.155	47.6	1550.155
51.4	1550.205	55.9	1550.23	54.7	1550.23
58.3	1550.275	63.3	1550.305	62.3	1550.3
70	1550.38	71.2	1550.41	68.7	1550.375
75.6	1550.51	81.7	1550.495	75.6	1550.465
78.7	1550.63	87.1	1550.635	82.2	1550.615
85.8	1550.78	90.2	1550.74	89.1	1550.775
92.2	1550.93	99.4	1550.905	96.3	1550.905
99.6	1551.105	110.6	1551.06	102.3	1551.07
104.8	1551.225	115.7	1551.175	108.3	1551.2
112.8	1551.36	116.7	1551.25	109.8	1551.295
118.9	1551.43	122.6	1551.385	116.9	1551.405
124.5	1551.515	130.7	1551.505	121.4	1551.53
131.7	1551.745	136.6	1551.685	125.6	1551.645
138.5	1551.84	143.3	1551.855	132.7	1551.825
144.9	1552.01	151.5	1552.045	136.6	1551.94
151.6	1552.15	156.9	1552.135	140.4	1552.035
156.6	1552.265	162.2	1552.29	146.3	1552.17

Tabel H.2 *Repeatability* sensor pada saat temperatur turun untuk 3 kali eksperimen

$T_1 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\lambda_{B1} (\text{nm})$	$T_2 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\lambda_{B2} (\text{nm})$	$T_3 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta\lambda_{B3} (\text{nm})$
29.7	1549.93	30.8	1549.942	30.6	1549.942
37	1550.01	36	1549.985	33.9	1549.985
43.6	1550.105	43.2	1550.095	44.6	1550.095
50.3	1550.19	50.2	1550.185	53.1	1550.185
57.1	1550.255	56.6	1550.26	59.7	1550.26
64.2	1550.34	63.6	1550.33	65.8	1550.33
71.4	1550.425	71.4	1550.42	72	1550.42
76.7	1550.495	76.4	1550.505	79.2	1550.505
82	1550.58	83	1550.675	90.8	1550.675
90	1550.745	92.9	1550.775	91.5	1550.775
96.9	1550.855	97.7	1550.915	98.6	1550.915
105.3	1551.015	108.7	1551.035	101.1	1551.035
110.8	1551.17	111.5	1551.18	107.9	1551.18
116.9	1551.31	119.2	1551.31	113.1	1551.31
124.2	1551.415	125	1551.475	119.9	1551.475
127.8	1551.555	130.3	1551.605	125.1	1551.605
135.6	1551.75	133	1551.775	131.6	1551.775
140.4	1551.87	141	1551.94	137.4	1551.94
147	1552.025	153	1552.045	142.3	1552.045
150.5	1552.09	160.3	1552.135	145.9	1552.135
156.3	1552.2	163.4	1552.22	151.1	1552.22
160.4	1552.34	166.3	1552.275	151.5	1552.275



Gambar H.1. Penentuan *repeatability error*

Berdasarkan hasil percobaan didapatkan hasil *error repeatability* sebesar :

$$\delta = \frac{\Delta}{F_S} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{(143,3 - 138,5)}{162,2} \times 100\%$$

$$\delta = \frac{4,8}{162,2} \times 100\%$$

$$\delta = 2,95 \%$$

LAMPIRAN I

Tabel I.1 Pengaruh pembengkokan FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya (percobaan pertama)

No	Pembengkokan FBG (mm)	Pergeseran $\Delta\lambda_B$ (nm)	Rugi Daya (dB)
1	0	1549,970	-65,364
2	1	1549,975	-65,470
3	2	1549,975	-65,327
5	3	1549,975	-65,234
6	4	1549,970	-65,093
7	5	1549,970	-65,101
8	6	1549,970	-65,032
9	7	1549,970	-65,013
10	8	1549,970	-65,058
11	9	1549,970	-65,072

Tabel I.2 Pengaruh pembengkokan FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya (percobaan kedua)

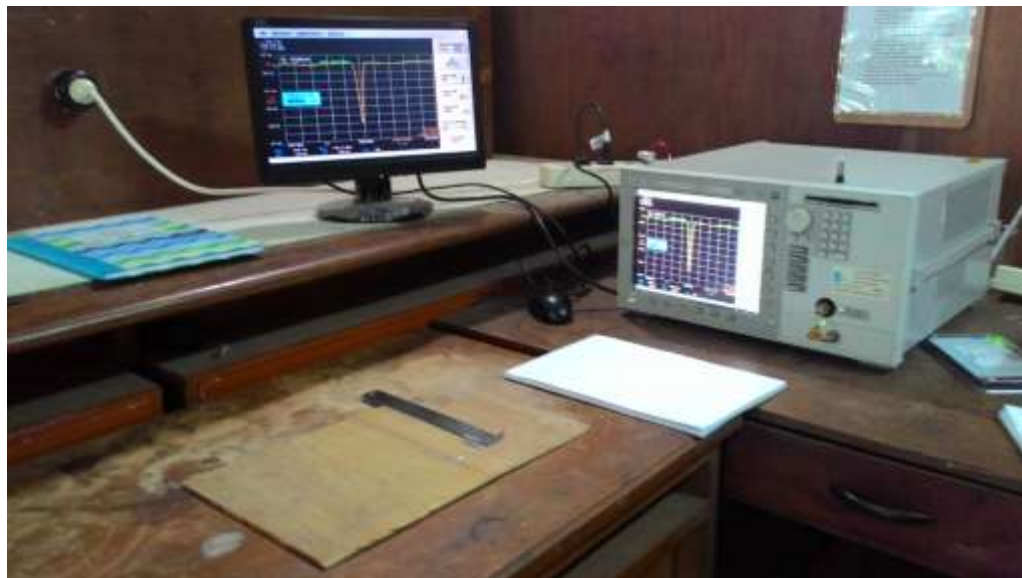
No	Pembengkokan FBG (mm)	Pergeseran $\Delta\lambda_B$ (nm)	Rugi Daya (dB)
1	0	1549,970	-65,276
2	1	1549,975	-65,018
3	2	1549,970	-64,930
5	3	1549,975	-64,823
6	4	1549,970	-64,756
7	5	1549,970	-64,629
8	6	1549,965	-64,507
9	7	1549,960	-64,459
10	8	1549,960	-64,417
11	9	1549,955	-64,331

Tabel I.3 Pengaruh pembengkokan FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya (percobaan ketiga)

No	Pembengkokan FBG (mm)	Pergeseran $\Delta\lambda_B$ (nm)	Rugi Daya (dB)
1	0	1549,970	-65,612
2	1	1549,970	-64,653
3	2	1549,960	-64,448
5	3	1549,965	-64,439
6	4	1549,960	-64,405
7	5	1549,965	-64,313
8	6	1549,970	-64,330
9	7	1549,965	-64,368
10	8	1549,965	-64,279
11	9	1549,960	-64,377

Tabel I.4 Pengaruh pembengkokan FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya (percobaan keempat)

No	Pembengkokan FBG (mm)	Pergeseran $\Delta\lambda_B$ (nm)	Rugi Daya (dB)
1	0	1549,970	-64,223
2	1	1549,965	-64,349
3	2	1549,965	-64,261
5	3	1549,970	-64,249
6	4	1549,965	-64,303
7	5	1549,965	-64,276
8	6	1549,965	-64,197
9	7	1549,960	-64,241
10	8	1549,960	-64,320
11	9	1549,960	-64,279



Gambar I.1. Rangkaian percobaan pengaruh pembengkokan FBG terhadap pergeseran panjang gelombang Bragg dan rugi daya.

TENTANG PENULIS



Andi Rosman Nuryadin, biasa disapa *Yozh* lahir di Bone Sulsel pada tanggal 10 Agustus 1988. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan Andi Nur Alam dan Andi Rosdiana. Pendidikan formal yang telah ditempuh selama ini adalah SD inpres 228 Peneki Kec. Takkalalla tamat pada tahun 2000. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Peneki Kec. Takkalalla tamat tahun 2003. Setelah lulus SMP kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMAN 1 Tellu Sianttinge dan tamat pada tahun 2006. Selanjutnya terdaftar sebagai mahasiswa S1 jurusan Fisika angkatan 2006 di Universitas Negeri Makassar. Pada tahun 2013, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di jurusan Fisika bidang minat Fisika Instrumetnasi pascasarjana ITS. Selama menempuh perkuliahan di ITS selain aktif di perkuliahan, penulis juga aktif di berbagai kegiatan diantaranya 1) sebagai panitia dalam workshop penulisan naskah akademik 1,2, dan 3 pada tahun 2013 yang diselenggarakan oleh ITS dan BGP. 2) Sebagai anggota tim *survey* Pemilu Legislatif Daerah pemilihan X di Kabupaten Gresik Jawa Timur tahun 2014. 3) Sebagai asisten dosen untuk asistensi mata kuliah Fisika Dasar 1 semester ganjil tahun 2014-2005. 4) Sebagai asisten dosen untuk asistensi mata kuliah Fisika Dasar 1 dan Fisika Dasar 2 semester genap tahun 2015.